Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

Санкт-Петербург 2018 ББК 22.3

Φ99

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

— Санкт-Петербург, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2018. – 416 стр. (с цветными иллюстрациями)

Издание подготовлено к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе информирует о миссии, основных направлениях деятельности и научной инфраструктуре. Большое внимание уделено результатам научной деятельности — достижениям и перспективам развития.

Подписано в печать 23.10.2018 Бумага мелованная. . Тираж 2500 экз. Отпечатано ООО «Профпринт» Санкт-Петербург, пос. Парголово, ул. Ломоносова, д. 113

ВЕК ФТИ

краткий исторический очерк

29 сентября 1918 года был подписан декрет о создании при Наркомате просвещения РСФСР Государственного рентгенологического и радиологического института (ГРРИ), включавшего физико-технический отдел — прародитель современного ФТИ им. А.Ф. Иоффе (далее – ФТИ), и располагавшегося на площадях Политехнического института в Ленинграде. Этот день принято считать днём рождения ФТИ. Первым президентом ГРРИ был избран А.Ф. Иоффе, он же возглавил и физико-технический отдел ГРРИ. Основными задачами Института, как и следует из его названия, ставились разработка рентгеновской техники, развитие методов исследований с применением рентгеновского излучения, а также проведение исследований с ионизирующим излучением. Из ГРРИ в итоге череды преобразований в 1930 году был сформирован Государственный физико-технический институт (ГФТИ) при Высшем совете народного хозяйства, на основе которого в 1933 году учреждён Ленинградский физико-технический институт (ЛФТИ) при Народном комиссариате тяжёлой промышленности СССР. Директором в ЛФТИ стал академик А.Ф. Иоффе. Постановлением Президиума АН СССР от 28 мая 1939 года институт был включен в состав Академии наук. В 1943 году в составе Института была образована Лаборатория №2 во главе с И.В. Курчатовым, из которой впоследствии был создан Курчатовский институт. В 1960 году ЛФТИ было присвоено имя А.Ф. Иоффе. В июле 1971 года в состав ЛФТИ был включен Институт полупроводников, которым ранее руководил А.Ф. Иоффе. В том же году Гатчинский филиал ЛФТИ был выделен в отдельный институт — Ленинградский институт ядерной физики (ныне Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова). В 2003 году из состава ФТИ был

выведен Научно-образовательный центр, на базе которого был образован Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический Университет. В 2013 году ФТИ был переподчинен Федеральному агентству научных организаций России, а в 2018 году передан в ведение Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

На протяжении своей истории в ФТИ наиболее широкое развитие получили два перспективных направления — физика полупроводников и ядерная физика. Ученые ЛФТИ внесли основополагающий вклад в реализацию советского атомного проекта. Еще в довоенные годы они инициировали в стране исследования в области ядерной физики; добились решения организационных проблем на государственном уровне, сформировали кадровую основу атомного проекта (И.В. Курчатов, А.П. Александров, Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, И.К. Кикоин и др.). Был разработан ряд методик по разделению изотопов урана; инициирована постройка самого крупного в Европе циклотрона. Неоценим вклад ученых Института в Победу в Великой Отечественной войне: были решены задачи размагничивания военных кораблей, создания импульсной радиолокации, обеспечения бесперебойного и продолжительного функционирования «Дороги жизни» по льду Ладожского озера, разработана противогангренная сыворотка. В послевоенные годы для проведения испытаний первой отечественной атомной бомбы в ФТИ были созданы высокоточные и высокочувствительные счетчики и источники нейтронов. Была разработана технология разделения изотопов для производства термоядерного оружия, решены задачи аэродинамики и тепловой защиты головных частей баллистических ракет для отечественной космонавтики. В ФТИ были созданы технологии силовой электроники и полупроводниковой оптоэлектроники, которые обеспечили технологическую независимость страны. Можно утверждать, что пионерские работы Института по созданию полупроводниковой науки и техники явились важным вкладом в мировую науку и значительной степени определили мировой прогресс во второй половине 20-го столетия.

В настоящее время ФТИ им. А. Ф. Иоффе представляет собой многопрофильный научно-технологический центр, ориентированный на решение крупных фундаментальных и прикладных научных проблем. В Институте успешно развиваются нанотехнологии для решения приоритетных задач энергетики и энергосбережения: разрабатываются эффективные фотоэлектрические и термоэлектрические преобразователи, мошные быстродействующие полупроводниковые коммутаторы, накопители энергии на основе литий-ионных аккумуляторов. В стенах ФТИ ведутся разработки в области термоядерной энергетики: сферических токамаков и систем диагностики для международного термоядерного реактора ИТЭР. Кроме исследований по атомной физике, физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза, астрофизике, значительная часть проводимых в Институте работ сосредоточена в области физики конденсированного состояния, физики и технологии полупроводников, квантовой электроники. Высокий уровень разработок Института подтверждается присуждением Нобелевских премий работавшим в Институте лауреатам — Н. Н. Семенову, Л.Д. Ландау, П.Л. Капице, И.Е. Тамму, Ж.И. Алферову.



Миссия и цель Института

ФТИ им. А. Ф. Иоффе видит свою миссию в решении актуальных проблем мировой науки и реализации крупных проектов государственной значимости по приоритетным направлениям науки и технологий, в развитии инновационных высокотехнологичных производств путем осуществления масштабных проектов в сфере НИОКР, в выполнении роли межуниверситетского физико-технологического научно-образовательного центра в Санкт-Петербурге для подготовки высококвалифицированных кадров для науки и промышленности.

Стратегическими целями Института являются получение новых физических знаний о природе, укрепление и расширение лидерских позиций в научных исследованиях и разработках, развитие сложившихся перспективных и создание новых, в том числе интердисциплинарных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований и их техническое перевооружение, развитие их кадрового и инфраструктурного обеспечения, создание условий для выполнения научно-исследовательских и опытно конструкторских работ в интересах государственных заказчиков и крупного бизнеса.

ФИЗТЕХ СЕГОДНЯ

Физтех в наше время является одним из крупнейших в России научно-исследовательских институтов физико-технического профиля. В Институте ведутся исследования и разработки по широкому спектру фундаментальных и прикладных физических проблем, в пространственном масштабе от исследования свойств и разработки наноструктурированных материалов до исследования характеристик Вселенной, во временном масштабе — от срока жизни Вселенной до фемтосекундных фотонных и электронных процессов.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Астрофизика высоких энергий и релятивистских объектов, космология, физика космических лучей и солнечной активности;
- Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез;
- Атомные, молекулярные и электронные процессы в газе, плазме и на поверхности;
- Квантовые явления в конденсированных средах, сверхпроводимость;
- Оптика структурированных сред и фотонных кристаллов;

- Магнетизм, спиновые взаимодействия и магнитооптика в твердотельных наноструктурах;
- Физические явления в полупроводниковых наногетероструктурах;
- Физико-химические процессы формирования твердотельных наносистем;
- Физика элементарных процессов разрушения и пластической деформации;
- Физика фазовых переходов, транспортные и структурные свойства конденсированных низкоразмерных и наноструктурированных систем, включая биологические;

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

- Технологии электроники и оптоэлектроники на основе полупроводниковых наногетероструктур;
- Технологии и приборы альтернативной энергетики (солнечная, водородная, гибридные технологии управляемого термоядерного синтеза, термоэлектричество);
- Технологии накопителей для автономной энергетики;

- Технологии полупроводниковой силовой и импульсной электроники;
- Технологии новых многофункциональных материалов и наносистем;
- Нанотехнологии для биологии и медицины;
- Новые физические методы исследований и диагностики наноматериалов

ВАЖНЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ

За последние пять лет в Институте получен ряд важнейших фундаментальных и прикладных результатов, к наиболее весомым из которых относятся:

2013 год

Исследования энергичных ионов на отечественных компактных установках, открывающие возможность создания нейтронного источника на основе сферического токамака Л.Г.Аскинази, Н.Н.Бахарев, М.И.Вильжюнас, В.К.Гусев, В.В.Дьяченко, В.А.Корнев, С.В.Лебедев, А.Д.Мельник, В.Б.Минаев, М.И.Миронов, Ю.В.Петров, Н.В.Сахаров, А.С.Тукачинский, Ф.В.Чернышев Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики

На компактных токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М экспериментально и теоретически исследована проблема удержания энергичных ионов, инжектированных в плазму. Идентифицированы механизмы потерь ионов. Установлена основная причина потерь — недостаточные величины магнитного поля и тока плазмы. Обнаружена сильная нелинейная зависимость нейтронного потока из плазмы от магнитного поля, обусловленная ростом плотности энергичных ионов. Полученные результаты явились основой для выбора параметров (магнитного поля и плазменного тока) модернизированного сферического токамака Глобус-М2. Эти параметры обеспечат возможности увеличения потока нейтронов на 2 порядка и разработки технологической основы термоядерного источника нейтронов.

Межоболочечное взаимодействие в изолированных атомах и эндоэдралах — атомах, помещённых внутрь фуллеренов *М.Я. Амусья, Л.В. Чернышева* Отделение твердотельной электроники

Выполнены теоретические исследования эффектов, возникающих при взаимодействии электронов, принадлежащих подоболочкам, различающимся орбитальными квантовыми числами. Показано, что межоболочечное взаимодействие ведёт к существенным, наблюдаемым экспериментально, особенностям в сечениях фотоионизации и неупругого рассеяния быстрых электронов на исследованных объектах вплоть до полной потери индивидуальных черт, присущих фотоионизации малоэлектронных подоболочек.

Спектроскопия одиночных квантовых точек в квантовых нитях.

А.В.Платонов, В.П. Кочерешко, В.Н. Кац, Г.Э. Цырлин, А.Д. Буравлев Отделение физики твердого тела

Измерен спектр поглощения одиночной квантовой точки GaAs, находящейся в изолированной квантовой нити AlGaAs. Определен энергетический спектр экситона, его волновые функции и интенсивности переходов, т.е. полностью описано состояние экситона в точке. Обнаружено аномальное уширение линии излучения экситона в квантовой точке, объясненное динамическим уширением вследствие электрической перезарядки окружающих

точку дефектов. Показано, что излучение из квантовой точки в кристаллографическом направлении (111) линейно поляризовано в направлении (110), единственной причиной чего может быть анизотропия квантовой точки, вызванная неаксиальным расположением ее внутри нити.

2014 год

Новый класс быстро вращающихся нейтронных звёзд с резонансным подавлением гравитационно-волновой неустойчивости *М.Е. Гусаков, А.И. Чугунов, Е.М. Кантор*

Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики

Нейтронные звезды — экстремальные космические объекты с плотностью вещества выше ядерной. Наблюдения горячих быстро вращающихся нейтронных звёзд являются загадкой для современной астрофизики, предсказывающей резкое замедление таких звезд из-за гравитационно-волновой неустойчивости. Авторами предложена теория подавления этой неустойчивости при определенных "резонансных" температурах из-за взаимодействия сверхтекучих и нормальных мод колебаний. Предложенная теория объясняет результаты наблюдений быстро вращающихся нейтронных звёзд, предсказывает существование нового класса нейтронных звёзд и предлагает новый метод исследования сверхплотного вещества нейтронных звёзд.

Эффекты квантового электронного храповика в графене

С.А. Тарасенко, М.М.Глазов, Е.Л. Ивченко Центр физики наногетероструктур

Предсказаны и теоретически исследованы эффекты электронного храповика и фотогальванические эффекты в системах на основе графена. Показано, что возбуждение графеновых структур электромагнитным полем приводит к фотоэдс, зависящей от поляризации и частоты света. Теоретически изучены механизмы генерации фототоков: эффект магнитного электронного храповика, краевой киральный фотогальванический эффект, оптическая инжекция чисто долинных токов, эффект увлечения электронов фотонами, а также эффекты генерации второй гармоники. Предсказанные эффекты обнаружены в совместных работах с экспериментаторами ведущих мировых научных центров. Исследования показывают перспективность создания устройств нелинейной электроники и оптоэлектроники на основе двумерных кристаллов — самых тонких систем, известных в природе.

Высокочувствительная томсоновская диагностика быстрых процессов в горячей плазме токамаков

М.Ю. Кантор и Д.В. Куприенко Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики

В лаборатории физики высокотемпературной плазмы разработана высокочувствительная томсоновская диагностика горячей плазмы. Диагностика основана на многопроходном (до 20 проходов) и многоимпульсном (до 50 импульсов) лазерном зондировании с частотой 10–20 кГц в течение одного импульса накачки. За счет многопроходности увеличена чувствительность, за счет многоимпульсности улучшено временное разрешение. Диагностика успешно применена сотрудниками ФТИ на ведущих европейских токамаках ASDEX-Upgrade и TEXTOR и на токамаке UNICAMP в Бразилии. С ее помощью удалось детально изучить механизмы нагрева, переноса и перезамыкания магнитных силовых линий в плазме, ограничивающие рост параметров плазмы на всех токамаках. Предложено использование такой диагностики на ИТЭРе.

2015 год

Квантование экситон-поляритонного конденсата в микрорезонаторе В.К.Калевич, М.М.Афанасьев, В.А.Лукошкин, К.В.Кавокин Отделение физики твердого тела

Исследовано образование бозе-эйнштейновского конденсата экситонных поляритонов в дискообразном вертикальном микрорезонаторе из GaAs/AlGaAs. Излучение конденсата обладает крупномасштабной пространственной когерентностью. Структурой конденсата можно управлять оптически, меняя пространственное распределение и концентрацию фотовозбужденных электрон-дырочных пар. При нерезонансном возбуждении сфокусированным лазерным лучом образуется конденсат в форме концентрических колец. Нарушение аксиальной симметрии при смещении пятна возбуждения из центра диска на величину *δ* приводит к трансформации колец в совокупность ярких лепестков, сформированную квантовыми состояниями с ненулевым угловым моментом. Развита теория бозе-газа с контактным отталкивающим взаимодействием, учитывающая неравновесную заселенность экситонных и поляритонных состояний, которая хорошо описывает эксперимент.

Управление модовым составом излучения широкоапертурных полупроводниковых лазеров

Н.Ю. Гордеев, А.С. Паюсов, Ю.М. Шерняков, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.В. Максимов Центр физики наногетероструктур

В настоящее время существует важная практическая проблема подавления поперечных оптических мод высокого порядка и улучшения качества пучка в мощных полупроводниковых лазерах с широкой апертурой. Для её решения предложена оригинальная конструкция лазерного волновода, основанная на связанных резонансных волноводах «CoupledLargeOpticalCavity». Конструкция использует эффект оптического туннелирования и позволяет селективно исключать из лазерной генерации вертикальные моды высокого порядка широкого активного волновода за счёт их резонансного туннелирования в оптически связанные пассивные волноводы). Широкий волновод, многомодовый в стандартных торцевых полупроводниковых лазерах, в CLOC-лазерах эффективно поддерживает генерацию только фундаментальной моды, имеющую уменьшенную расходимость, высокое качество, высокую температурную и токовую стабильность. Разработанная конструкция волновода позволяет увеличивать апертуру излучения, повышать оптическую мощности и яркость торцевых полупроводниковых лазеров, работающих в любых спектральных диапазонах.

Новые спиновые явления в полупроводниковых коллоидных нанокристаллах

А.В. Родина, Д.Р. Яковлев, М. Bayer, А.А. Головатенко, Ю.Г. Кусраев Отделение физики твердого тела

Предложена и развита модель, объясняющая особенности низкотемпературных оптических спектров класса немагнитных полупроводниковых коллоидных нанокристаллов. В основе модели — взаимодействие носителей заряда с магнитными моментами оборванных связей на поверхности нанокристаллов. Предсказаны эффективный механизм рекомбинации темного (запрещенного по спину) экситона и возникновение макроскопического магнитного момента в немагнитных нанокристаллах в результате динамической поляризации спинов оборванных связей. Динамическая поляризация происходит при температурах ниже критической в процессе оптической накачки и радиационной рекомбинации темного экситона и приводит к формированию поверхностного магнитного полярона.

2016 год

Монодисперсные композитные частицы на основе нанопористого оксида кремния для диагностики и терапии онкологических заболеваний

В.Г.Голубев, Д.А. Еуров, Д.А. Кириленко, Ю.А. Кукушкина, Д.А. Курдюков, Е.Ю. Стовпяга Отделение твердотельной электроники

Разработана технология синтеза многофункциональных гибридных частиц типа «ядро-оболочка», представляющих собой сферические мезопористые частицы кремнезема с девиацией размеров меньше 4 %, заполненные оксидами гадолиния и европия и покрытые оболочкой мезопористого кремнезема. Частицы размером 50-500 нм легко диспергируются в воде, обладают большой удельной поверхностью (300 м2 г-1) и объемом пор (0.3 см3 г-1), являются ярким твердотельным люминофором, стабильным в водных средах. Частицы перспективны для терапии (гадолиниевая нейтрон-захватная терапия и наноконтейнер для адресной доставки химиотерапевтических препаратов) и диагностики (люминесцентный маркер и магнитно-резонансная томография) онкологических заболеваний.

Электронные свойства топологических изоляторов на основе теллуридов

М.В.Дурнев, Г.В.Будкин, М.О.Нестоклон, Л.Е.Голуб, Е.Л.Ивченко, С.А.Тарасенко Центр физики наногетероструктур

Проведено теоретическое исследование поверхностных и краевых состояний в трехмерных и двумерных топологических изоляторах на основе соединений теллуридов ртути, висмута и сурьмы. Развита теория тонкой структуры дираковских состояний в квантовых ямах HgTe/CdHgTe, которая предсказывает расщепление дираковских конусов в толще квантовой ямы (теория позволила объяснить эксперименты по магнитотранспорту) и сильную анизотропию эффекта Зеемана для электронов, распространяющихся по краевым состояниям. ских изоляторах на основе HgTe, Bi2Te3 и Sb2Te3. Теория позволила описать эксперименты по фототокам, индуцированным терагерцовым излучением в этих системах, и определить параметры энергетического спектра граничных состояний.

Исследование тороидальных альфвеновских мод на токамаке Глобус-М Ю.В. Петров, Н.Н. Бахарев, В.А. Корнев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, Н.В. Сахаров, П.Б. Щёголев Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики

Тороидальные альфвеновские возмущения (TAE) возникают в плазме токамака при наличии в нём быстрых частиц со скоростями превышающими альфвеновскую. Они могут стать препятствием на пути создания компактного термоядерного источника нейтронов на базе сферического токамака (TИH-CT), основанного на инжекции пучка быстрых атомов в плазму-мишень с нетермоядерными параметрами. Авторами исследованы условия возникновения TAE в сферическом токамаке, их структура и зависимость от изотопного состава плазмы. Впервые зарегистрированы потери потока нейтронов, вызываемые одиночными TAE. Сделан благоприятный прогноз по уменьшению потерь в TИH-CT при увеличении магнитного поля и тока плазмы.

2017 год

Акустический диод и лазер А.Н.Поддубный, А.В.Пошакинский Центр физики наногетероструктур

Разработаны теоретические основы нового типа акустооптических логических элементов на основе полупроводниковых квантовых гетероструктур со сверхрешеткамии, осуществлено экспериментальное подтверждение теории. Установлено, что гетероструктура, состоящая из чередующихся узких и широких квантовых ям, может работать как перестраиваемый одномодовый акустический лазер.

Фотодинамическое воздействие на клетки и ранняя диагностика онкологических заболеваний А.В.Белашов, В.П.Белик, О.С.Васютинский, И.М.Гаджиев, А.Л.Глазов, И.В.Семенова Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики

Разработан принципиально новый метод исследования фотодинамического воздействия (ФДВ) на клетки и клеточные структуры, основанный на технике цифровой голографической микроскопии (ЦГМ). Предложен и апробирован метод экспресс-диагностики онкологических заболеваний на основе анализа биопсийных образцов с помощью ЦГМ.

Высококачественный графен на SiC для электронных приборов нового поколения

А.А. Лебедев, В.Ю. Давыдов, С.П. Лебедев, А.Н. Смирнов, М.С. Дунаевский, И.А. Елисеев Отделение твердотельной электроники

Создана не имеющая аналогов в России технология роста эпитаксиального монослойного графена большой площади методом сублимации в аргоне Si-грани SiC. Структурные, электронные и транспортные свойства выращенного графена сравнимы с параметрами лучших мировых образцов, изготовленных сублимацией, что открывает возможность его использования для создания электронных приборов нового поколения.

ПРЕМИИ, НАГРАДЫ, ПРИЗНАНИЕ

ЗА НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ СОТРУДНИКАМ ФТИ

2013 год

- Премия «The 2013 Karl W. Böer Solar Energy Medal of Merit» академик Ж.И. Алферов, профессор В.М. Андреев.
- Премия им. Д.С.Рождественского Российской академии наук академик А.А. Каплянский, д.ф.-м.н. С.П. Феофилов, д.ф.-м.н. А.К. Пржевуский — за цикл работ «Спектроскопические исследования структуры примесных центров и электронных процессов в диэлектриках, содержащих ионы редких земель и переходных металлов».
- Победители конкурсов на соискание медалей РАН для молодых ученых к. ф.-м.н. Н.В. Теплова (Косолапова) за цикл работ «Исследование микро-турбулентности плазмы токамака», М.М. Глазов за цикл работ «Когерентная спиновая динамика электронов в наноструктурах».
- Премия имени Иоффе Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся научные результаты — чл.-корр. РАН П.С. Копьев — за разработку научных основ молекулярнопучковой эпитаксии низкоразмерных полупроводниковых структур.

2014 год

- Премия Президента Российской Федерации 2014 года в области науки и инноваций для молодых ученых — к.ф.-м.н. А.М. Калашникова «За вклад в развитие физики сверхбыстрых магнитных явлений и методов сверхбыстрого управления магнитным состоянием вещества».
- Премия имени Эйлера Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся научные результаты к.ф.-м.н. А.М. Калашникова за цикл работ «Новые методы эффективного сверхбыстрого управления магнитным состоянием вещества».
- Лауреат первого Общероссийского конкурса реализованных инновационных проектов в области энергетики «ЭНЕРГИЯ ПРОРЫВА», организованного Некоммерческим партнерством «Глобальная энергия» Д.М. Малевский.

2015 год

- Премии Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся научные результаты: член-корр. РАН Е.Л. Ивченко — премия имени А.Ф. Иоффе, д.ф.-м.н. П.Г. Баранов — премия имени А.С. Попова, д.ф.-м.н. М.М. Глазов — премия имени Л. Эйлера.
- Премия Правительства Санкт-Петербурга за «Научные достижения, способствующие повышению качества подготовки специалистов и кадров высшей квалификации» д.ф.-м. н. С.Б.Вахрушев.
- Премия Правительства Санкт-Петербурга за 1 место в конкурсе на лучший инновационный продукт 2015 г. в сфере товаров промышленного назначения — «Тензорезисторы на основе сульфида самария, легированного атомами европия (SmEuS)», д.т.н. В.В. Каминский, к.ф.-м.н. С.М. Соловьёв.
- Медаль Е.Ф. Гросса Оптического общества им. Д.С. Рожденственского д.ф.-м. н. В.П. Кочерешко.

2016 год

- В действительные члены РАН избран член-корр. РАН А.Г. Забродский,
- В члены корреспонденты РАН избраны: д.т.н. В.М. Андреев, д.ф.м.н. М.М. Глазов и д.ф.-м.н. А.В. Иванчик.
- Золотая медаль имени П.Н.Лебедева академику Е.Б. Александрову за цикл работ «Квантовая и шумовая магнитоспектроскопия «.
- Медали РАН для молодых ученых с премиями к.ф.-м.н. П.С. Алексееву, к.ф.-м.н. Н.В.Глебовой и к.ф.-м.н. Я.В.Кузнецовой.
- Медаль «Ордена за заслуги перед Отечеством» І степени д.ф.-м.н. М.П. Петрову.
- Грантами Президента РФ поддержана ведущая научная школа академика Д.А. Варшаловича «Релятивистская астрофизика и космология: спектроскопия квазаров, нейтронные звезды и остатки сверхновых».
- Премия имени А.Ф. Иоффе Правительства Санкт-Петербурга и СПбНЦРАН — д. ф.-м. н. Ю.Г. Кусраеву за «Фундаментальные исследования спин-зависимых явлений в полупроводниковых и гибридных наноструктурах, спиновой динамики в разбавленных магнитных полупроводниках».

- Гранты Президента РФ для поддержки исследований молодых докторов и кандидатов наук предоставлены научным сотрудникам М.М.Глазову, П.С.Алексееву, П.А.Алексееву, М.В.Дурневу, Г.С.Курскиеву, А.Н.Поддубному.
- Стипендия Правительства РФ для поддержки научных исследований аспирантке Д.А. Андрониковой.
- Победителями конкурса для аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга стали 12 аспирантов Института.
- Почетная грамота комитета по науке, образованию, культуре, средствам массовой информации и делам общественных организаций Государственного собрания республики Саха (Якутия) — д.ф.-м.н. В.В. Каминскому за многолетний добросовестный труд и значительный вклад в становление якутской школы теплофизики и материаловедения.

2017 год

- Ведомственным знаком отличия Федерального агентства научных организаций «За заслуги в развитии науки» награждён директор института академик А.Г. Забродский.
- Членом Президиума РАН избран академик А.Г. Забродский
- Членами бюро Отделения физических наук РАН избраны академики А.Г. Забродский и Р.А. Сурис.
- Заместителем председателя Координационного совета по делам молодежи в научной и образовательной сферах при Совете при Президенте Российской Федерации по науке и образованию утверждена к.ф.-м.н. А.М. Калашникова.
- Премия имени А.Ф. Иоффе за цикл работ «Теория резонансных явлений в процессах взаимодействия фотонов, электронов и позитронов с атомами, фуллеренами и эндоэдралами» присуждена д.ф.-м.н. М.Я. Амусье и д.ф.-м.н. Л.В. Чернышевой.
- Стипендия Правительства РФ за выдающиеся достижения в области научных исследований в интересах ВПК присуждена инженеру С.С.Беляеву.
- Победитель конкурса «Эврика! Идея», проводимом РФФИ совместно с Фондом поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие», проект по исследованию возможности создания нового легкого и прочного конструкционного материала на основе композита алюминий-углеродные нановолокна, руководитель аспирант А. Возняковский.

- Грантами Президента РФ поддержаны научные исследования «Тонкая структура спектра и спиновая динамика экситонов в новых полупроводниковых наносистемах» молодого доктора наук М.М. Глазова и «Исследования нейтронных звезд и их окрестностей на основании многоволновых наблюдений» молодого кандидата наук Д.А. Зюзина.
- Стипендией Президента РФ поддержаны научные исследования, проводимые молодыми научными сотрудниками С.П. Лебедевым и Д.В. Нечаевым.
- Победители конкурса грантов Правительства СПб для аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга: Д.А. Андронникова, А. Н. Афанасьев, Д.А. Веселов, Т.Э. Кулешова, М.А. Просников, М.В. Рахлин, Ф.Б. Свинарев, Л.А. Сокура, М.Ю. Чернов.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Международные научные связи позволяют Институту достоверно определить уровень собственных исследований, корректировать направления разработок для их соответствия наиболее активно развивающимся в мире тематикам исследований, получать доступ к наиболее передовому и уникальному исследовательскому и технологическому оборудованию в ведущих научных центра по всему миру.

Институт осуществляет совместные исследования с более чем 150 зарубежными научными центрами, среди которых такие значимые как CERN (включая Большой адронный коллайдер), международный термоядерный реактор ITER, Российско-Германская синхротронная лаборатория BESSY, объединенный Европейский токамак JET (Евроатом), Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур (Польша), Фраунгоферовский Институт Солнечных Энергосистем (Германия), Международный астрономический центр (Польша). Институт плодотворно сотрудничает с Университетами Дортмунда, Принстона, Регенсбурга, Хельсинки и др.

Участие в международных конференциях способствует получению актуальной научной информации по основным направлениям исследований и позволяет представлять научному сообществу свои достижения. Сотрудники Института ежегодно участвуют в более чем 110 международных конференциях и организовывают более 10 конференций с участием иностранных партнеров в России.

БЮДЖЕТ

Объем финансирования Института в 2017 году составил около 2,4 млрд. руб. 60% этой суммы поступила из государственного бюджета от Федерального агентства научных организаций (в настоящее время Министерство науки и высшего образования). Остальное финансирование получено в результате участия в конкурсах: контракты и гранты Минобрнауки, ГК «Росатом», Российского научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований, Федерального космического агентства, Программы фундаментальных исследований РАН, по контрактам с внебюджетными заказчиками.

Структура расходов Института характеризуется критически малой долей затрат на материалы, обо-

рудование и прочие расходы. Вместе с многолетним недофинансированием российской фундаментальной науки, бюджет которой на 70% состоит из зарплаты сотрудников, это ставит под угрозу поддержание уровня научных исследований на мировом уровне. Главный источник доходов, используемых Институтом на развитие, поступления от грантов и хоздоговоров. Основные характеристики финансовой деятельности Института в 2017 г. собраны в таблице 2.

Бюджет ВСЕГО (млн. руб.)	2 400
Субсидия на выполнение Государственного задания (млн. руб.)	950
Внебюджетные источники финансирования (млн. руб.)	780
Строительство НИОКР-центра (млн. руб.)	450
Средняя заработная плата работников (тыс. руб.)	52,5
Средняя заработная плата научных сотрудников (тыс. руб.)	69,4
Износ основных средств на 01.01.2018	77,46%

Основные характеристики финансовой деятельности Института в 2017 г.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

В Федеральном институте промышленной собственности РФ Институтом к своему столетию зарегистрировано 175 патентов и 26 свидетельств на программы для ЭВМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

На протяжении столетней истории ФТИ им. А.Ф. Иоффе большое внимание уделял созданию, регистрации и поддержке результатов интеллектуальной деятельности. В советские времена вплоть до 1991 года существовал такой объект интеллектуальной собственности, как открытие. Согласно Постановлению СССР № 584 от 21 августа 1973 года под открытием понималось установление неизвестных ранее объективно существующих закономерностей, свойств и явлений материального мира, вносящих коренные изменения в уровень познания. В качестве открытия мог быть квалифицирован не любой научный результат, а лишь тот, который вносил коренные изменения в знания об окружающем материальном мире. Всего было зарегистрировано порядка 15 открытий научных сотрудников Института, что было сопоставимо с количеством открытий в ведущих научных учреждениях страны. В архивах патентно-лицензионной службы хранятся свидетельства на такие открытия, как "Явление электроакустического эха в пьезоэлектриках", "Явление возникновения рекомбинационных волн в полупроводниках", "Свойство химической инертности примесей металлов в полупроводниках со стехиометрическими вакансиями", "Закономерность распределения концентрации изотопов гелия Земли" и другие.

После девяностых годов прошлого века наблюдался спад интереса к интеллектуальной собственности как в стране в целом, так и в Институте, однако в последнее десятилетие нынешнего века научными сотрудниками все более и более осознается важность охраны результатов интеллектуальной деятельности и дальнейшего их продвижения в производство. Благодаря мотивационной политике Института, количество действующих патентов, принадлежащих Институту, увеличилось до 175. Институту принадлежит 10 ноу-хау, оформлено 26 свидетельств на программы для ЭВМ.

Интеллектуальная собственность, принадлежащая ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отражает основные направления научно-технической деятельности Института. Наиболее инновационно-активной лабораторией Института является лаборатория Фотоэлектрических преобразователей, которая оформила большое количество патентов на каскадные фотоэлектрические преобразователи, солнечные концентраторные фотоэлектрические установки, фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения и способы их изготовления. Солнечной энергетикой также занимается лаборатория Физико-химических свойств полупроводников, запатентовавшая тонкопленочные солнечные элементы. Всего Институтом получено порядка 60 патентов в области солнечной энергетики. Лабораторией Микроволновой спектроскопии кристаллов запатентовано 13 технических решений, связанных с разработками линейки спектрометров ЭПР/ОДМР высокочастотного диапазона и оптических квантовых магнитометров и квантовых термометров. 10 патентов защищают технические решения в области мощных полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне 650-1800 нм, и приборов на их основе, разработанных лабораторией Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей. На основе разработок лаборатории физики полупроводниковых гетероструктур получено 3 патента в области полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров. Лабораторией Инфракрасной оптоэлектроники создан ряд технических решений, относящихся к инфракрасной оптоэлектронике на основе полупроводников A3B5, защищённых 7 патентами. Эта лаборатория также запатентовала устройство для обнаружения водорода. Институту принадлежит 10 патентов в области силовой полупроводниковой электроники и импульсной техники, разрабатываемой в лаборатории Мощных полупроводниковых приборов. Лабораторией Квантовой электроники запатентовано 5 технических решений в области интегрально-оптических модуляторов. В лаборатории Интегральной оптики на гетероструктурах разработаны устройства для генерации второй гармоники оптического излучения и защищены 3 патентами. Лабораторией Оптоэлектроники и голографии получено 4 патента на устройства для определения положения объекта. 5 патентов посвящены наноуглеродным материалам, созданным в лаборатории Кластерных структур. Среди тематик патентования, представленных в Институте, можно отметить также термоэлектричество (лаборатория Кластерных структур), топливную энергетику (лаборатория Мощных полупроводниковых приборов), а также разработку электростатических анализаторов заряженных частиц (лаборатория Физики атомных столкновений) и устройств защиты рабочих элементов литографического оборудования от потоков пылевых частиц и способов их защиты (лаборатория Полупроводниковой квантовой электроники).



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПАТЕНТОВ

В Институте в среднем за год создаётся около 50 комплектов конструкторской и технологической документации.

Интеллектуальная собственность, принадлежащая Институту, это интеллектуальный потенциал, имеющий огромное прикладное значение и способный приносить в дальнейшем коммерческую выгоду. На арегулярной основе производится оценка и постановка на бухгалтерский учет создаваемая интеллектуальная собственность Института, заключаются лицензионные договоры с индустриальными партнёрами, способствующие внедрению разработок Института в производство. Все эти мероприятия, в конечном итоге, приводят к сокращению дистанции между фундаментальной наукой и интересами общества в целом.

ПУБЛИКАЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ

На протяжении 2013-2017 гг. сотрудниками института опубликовано более 6.5 тысяч работ в ведущих отечественных, зарубежных и международных журналах, что соответствует публикации примерно 1.5 статей на одного научного сотрудника в год. По числу публикаций в журналах с высоким импакт-фактором и их востребованности (индексу цитируемости) Институт занимает одно из лидирующих мест в России. За пятилетний период было зафиксировано более 25 тысяч цитирований, что составляет примерно 3.8 цитирований на одну статью.

НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

С 01.01.2018 Институт осуществляет самостоятельную хозяйственно-финансовую деятельность по изданию пяти академических физических журналов, в которых он является соучредителем вместе с Российской академией наук: «Журнал технической физики», «Письма в журнал технической физики», «Физика и техника полупроводников», «Физика твердого тела», «Оптика и спектроскопия».

КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Создание значительной интеллектуальной собственности Института стало возможным благодаря высокому интеллектуальному потенциалу работников Института. К столетнему юбилею Институт сохранил кадровый потенциал в составе почти 2 тысяч сотрудников, но с учётом занятости среднесписочная численность составляет немногим более 1,5 тысяч ставок. Из общего числа сотрудников около 1 тысячи работников участвуют в научных исследованиях и разработках (с учётом занятости — около 800 ставок списочного состава). В Институте трудится 514 главных, ведущих и старших научных сотрудников и 277 научных и младших научных сотрудников, среди которых: 6 — действительные члены РАН, 14 — члены-корреспонденты РАН, 237 — доктора и 504 — кандидаты наук.

Институт уделяет большое внимание подготовке научных кадров. Специалисты высокой квалификации

готовятся в очной институтской аспирантуре, в которой обучается примерно 100 человек ежегодно. Обучение ведется по 7 специальностям: физика конденсированного состояния, физика полупроводников, физика плазмы, астрофизика и звездная астрономия, физическая электроника, теоретическая физика, механика жидкости, газа и плазмы. При Институте работают 3 диссертационных Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций. Среднее количество защит диссертаций в год составляет: докторских — 5, кандидатских — 16. Институт участвует в пилотном проекте по самостоятельному присуждению ученых степеней.

Для подготовки магистров и специалистов по востребованным Институтом специальностям Институт использует систему из 7-и базовых кафедр в ведущих университетах Санкт-Петербурга: СПбГУ, СПбГПУ, СПбГЭТУ и др.

СТРУКТУРА ФТИ

Институт включает 69 научных лабораторий, секторов и научно-образовательных центров, а также10 научно-вспомогательных подразделений.

Институт состоит из научных и научно-вспомогательных подразделений, а также общеинститутских служб. Научные подразделения объединены по тематическому принципу в 5 Отделений: Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, Отделение физики твердого тела, Отделение твердотельной электроники, Центр физики наногетероструктур, Отделение физики диэлектриков и полупроводников.

ОТДЕЛЕНИЯ ВКЛЮЧАЮТ СЛЕДУЮЩИЕ ЛАБОРАТОРИИ, СЕКТОРА И НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ (НОЦ):

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ, АТОМНОЙ ФИЗИКИ И АСТРОФИЗИКИ

- лаб. Атомной радиоспектроскопии,
- лаб. Экспериментальной астрофизики,
- лаб. Масс-спектрометрии,
- лаб. Физики атомных столкновений,
- лаб. Астрофизики высоких энергий,
- лаб. Физики адсорбционно-десорбционных процессов,
- лаб. Физики высокотемпературной плазмы,
- лаб. Космических лучей,
- лаб. Спиноптроники,
- лаб. Микроволновой спектроскопии кристаллов,
- лаб. Оптики поверхности,
- лаб. Физики прочности,
- сектор Физической кинетики и электроакустических явлений,
- лаб. Оптики полупроводников,

- лаб. Атомных столкновений в твердых телах,
- Циклотронная лаборатория,
- лаб. Физической газодинамики,
- лаб. Физики элементарных структур на поверхности,
- лаб. Физики низкотемпературной плазмы,
- сектор Численного моделирования,
- сектор Теоретической астрофизики;
- лаб. Фотоэлектрических явлений в полупроводниках,
- лаб. Физики профилированных кристаллов,
- лаб. Динамики материалов,
- лаб. Физики ферроиков,
- лаб. Физико-химических свойств полупроводников,
- лаб. Спектроскопии твердого тела,
- лаб. Физики фазовых переходов в твердых телах;

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

- лаб. Физики термоэлементов,
- лаб. Нейтронных исследований,
- лаб. Кинетических явлений в твердых телах при низких температурах,
- лаб. Диффузии и дефектообразования в полупроводниках,
- сектор Теории полупроводников и диэлектриков,
- лаб. Физики редкоземельных полупроводников,
- лаб. Физики анизотропных материалов,

- лаб. Дифракционных методов исследования реальной структуры кристаллов,
- лаб. Физики сегнетоэлектричества и магнетизма,
 - ЦЕНТР ФИЗИКИ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР
- сектор Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках,
- лаб. Фотоэлектрических преобразователей,
- лаб. Инфракрасной оптоэлектроники,
- лаб. Диагностики материалов и структур твердотельной электроники,
- сектор Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле,
- лаб. Полупроводниковой квантовой электроники,
- лаб. Новых неорганических материалов,
- лаб. Оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью,

- лаб. Электроники полупроводников с большой энергией связи,
- лаб. Оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах.

- лаб. Квантоворазмерных гетероструктур,
- лаб. Квантовой фотоники,
- лаб. Радиофотоники,
- НОЦ Новые и возобновляемые источники энергии,
- НОЦ Физика и технология светоизлучающих приборов на основе п/п наноструктур,
- лаб. Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей,
- лаб. Интегральной оптики на гетероструктурах,
- лаб. Физики полупроводниковых гетероструктур;

ОТДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

- лаб. Неравновесных процессов в полупроводниках,
- лаб. Нелинейных оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках,
- лаб. Физики кластерных структур,
- лаб. Физики аморфных полупроводников,
- лаб. Мощных полупроводниковых приборов,
- лаб. Литий-ионной технологии,
- сектор Теоретических основ микроэлектроники,

- лаб. Прикладных проблем сильноточной электроники,
- лаб. Физики полупроводниковых приборов,
- лаб. Оптоэлектроники и голографии,
- сектор Теории твердого тела,
- лаб. Прикладной математики и математической физики,
- лаб. Квантовой электроники,
- лаб. Систем передачи сигналов и энергии;

В ЧИСЛО НАУЧНО-ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ВХОДЯТ:

- Научная библиотека (филиал БАН),
- Отдел научно-технической информации,
- Патентно-лицензионная служба,
- Служба по защите конфиденциальной информации,
- Отдел трансфера технологий,
- Отдел перспективного развития технических средств и программного обеспечения,

- Конструкторское бюро,
- Метрологическая служба,
- Служба менеджмента качества,
- Научный архив и музей.
- Деятельность научных и научно-вспомогательных подразделений
 - обеспечивают инженерно-технические службы:
- Механосборочный цех,

- Участок нестандартного оборудования,
- Криогенная станция,
- Отдел дозиметрии ионизирующих излучений,
- Экологический отдел,
- Отдел главного энергетика,
- Служба связи,
- Ремонтно-строительный участок,

- Транспортный отдел,
- Участок водоканализационного хозяйства,
- Эксплуатационно-технический отдел.
- В состав Института входит группа административных и экономических подразделений, а также служб обеспечения работ.

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА

Инженерно-техническая инфраструктура Института является сложнейшим инженерно-энергетическим комплексом. Институт и его инфраструктура расположены расположен на двух территориальных площадках в Санкт-Петербурге. Одна из них располагается по двум адресам: ул. Политехническая 26 и ул. Политехническая 28. Другая, Шуваловская площадка, находится по адресу ул. Академика Харитона 7.



Площадка Института на Политехнической улице.

Инженерно-техническая инфраструктура



Шуваловская площадка Института

Всего за Институтом закреплено 93 объекта недвижимого имущества суммарной площадью 142172 кв. м. на 9 земельных кадастровых участках общей площадью 22,4 га.

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ИНСТИТУТА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ЕГО ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, ВКЛЮЧАЕТ СЛЕДУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ:

- телефонные сети и сети электронной связи,
- внутриплощадочные сети электро-, водо и теплоснабжения,
- 12 трансформаторных подстанций
 с 17 трансформаторами на суммарную мощность 13490 кВА,
- газопроводы наружные для природного газа и гелия,
- котельная,

- станция нейтрализации промстоков,
- механосборочный цех, содержащий 47 станков,
- транспортный цех с 25 единицами автомобильной техники,
- криогенная станция, обладающая производительностью 200 тысяч литров жидкого азота в год и 12 тысяч литров жидкого гелия в год.

НАУЧНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА

Научная инфраструктура Института, обеспечивающая проведение фундаментальных исследований и прикладных разработок, включает следующее:

- Федеральный центр коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях»;
- три уникальных научных установки (УНУ):
- УНУ «Сферический токамак Глобус-М2»,
- УНУ «Циклотрон ФТИ им. А. Ф. Иоффе типа У-120 с возможностью ускорения ионов в широком диапазоне энергий»,
- УНУ «Установка для отработки методов нагрева и оптимизации сценариев удержания высокотемпературной плазмы ТУМАН-3М»;

- Комплекс эпитаксиальных технологий МПЭ и ГФЭ MOC (MBE & MOCVD);
- Комплекс планарных (постростовых) технологий;
- Научно-технологический комплекс по созданию литий-ионных аккумуляторов;
- Криомагнитная система исследования материалов;
- Научно-технический комплекс «Лазерные и оптические измерительные технологии».

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА В ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ»

Развитие новых технологий, определяющих современный уровень микро-, нано – и оптоэлектроники, невозможно без диагностического сопровождения, позволяющего получать наиболее полную, количественно точную информацию об основных физических и физико-химических параметрах и характеристиках на всех этапах процесса разработки или производства наногетероструктур и приборов на их основе. Такую информацию можно получить лишь при наличии специально созданного диагностического комплекса, основанного на использовании современных взаимодополняющих методов, обеспечивающих, так называемую «доказательную» диагностику. Для исследования наногетероструктур сформирован и динамично развивается комплекс методов практической диагностики такого типа.

Развитие методов диагностики наноматериалов является одним из непременных условий создания и совершенствования нанотехнологий. Например, для выбора и корректировки условий синтеза наноструктур необходимо получение наиболее полной и количественно точной информации об основных физических и физико-химических параметрах и характеристиках на всех этапах технологического процесса получения наноструктур (элементный, фазовый и химический состав; параметры реальной кристаллической и электронной структуры; геометрические параметры; электрофизические и оптические характеристики). Характерной особенностью наноструктур являются малые геометрические размеры составляющих их элементов, что постоянно требует улучшения и оптимизации таких метрологических параметров, как чувствительность и пространственное разрешение существующих методов, и поиск новых методов, расширяющих функциональные возможности комплексной диагностики, а также развитие программного обеспечения.

Центр коллективного пользования (ЦКП) «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» был создан в 1994 году по инициативе чл.-корр. РАН С.Г. Конникова, который является одним из основоположников диагностики полупроводниковых гетероструктур. Им впервые была выдвинута и реализована концепция комплекса необходимых взаимодополняющих методов исследования и контроля, встроенных в технологию изготовления гетероструктур и приборов на их основе, а также разработана совокупность оригинальных методик их характеризации с субмикронным и нанометровым пространственным разрешением. Применение разработанного диагностического комплекса в значительной степени способствовало разработке технологии получения гетерокомпозиций многокомпонентных твердых растворов АЗВ5 и оптоэлектронных приборов нового поколения. За цикл работ «Изопериодические гетероструктуры многокомпонентных (четверных) твёрдых растворов полупроводниковых соединений АЗВ5» С.Г. Конников в составе авторского коллектива в 1984 г. был удостоен Государственной премии СССР.

В 2015 году ЦКП получил статус федерального и в настоящее время он представляет собой комплекс взаимодополняющих методов диагностики, включающий в себя количественную растровую и просвечивающую электронную микроскопию, рентгеноспектральный микроанализ, высокоразрешающую рентгеновскую дифрактометрию, рентгенофотоэлектронную спектроскопию, оже-электронную спектроскопию, динамическую вторично-ионную масс-спектрометрию, а также сканирующую зондовую микроскопию, методы спектроскопии полной проводимости и емкостной спектроскопии.

ФЦКП обеспечивает проведение исследований в целях обеспечения реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в области создания экологически чистой, ресурсосберегающей, безопасной гибридной ядерной энергетики в рамках утвержденной Правительством Российской Федерации Приоритетной научной задачи «Исследование и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной ядерной энергетики». В связи с этим в ФЦКП развиваются два направления: исследования в области материаловедения



Рисунок 1. Сопоставление экспериментального и рассчитанного профилей эффективной концентрации носителей заряда NCV(z) (а) и вычисленные распределения по толщине HEMT-структуры концентрации двумерных электронов n2D(z) и эффективного потенциала Veff(z) (b). Точки — эксперимент, сплошные линии — расчет.



Рисунок 2. ПЭМ изображение поперечного сечения исследуемой HEMT – структуры.



Рисунок 3. Распределение по толщине НЕМТ-структуры легирующей примеси Si (♥) (а) и матричных элементов III группы In (●) и AI (●) (b), измеренные с помощью метода ВИМС. Линиями показаны соответствующие параметры, используемые для модельных расчетов



Рисунок 4. ПЭМ изображение малых (а) и больших (b) KT InSb/InAs в планарной геометрии в двулучевых дифракционных условиях.



Рисунок 5. ВРЭМ изображение в поперечном сечении KT InSb/InAs с дефектом упаковки внутри. конструкционных материалов, используемых для создания термоядерных установок, и исследования в области создания перспективной электронной компонентной базы микро – и наноэлектроники и фотоники на полупроводниковых гетероструктурах.

Разработана методика определения распределения свободных носителей заряда *NCV(z)* по глубине полупроводниковых многослойных наногетероструктур методом электрохимического вольт-ёмкостного профилирования (ECV) [1]. На примере структур транзисторов с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – HEMT) на основе гетероструктур InGaAs/AIGaAs/GaAs с квантоворазмерными слоями показано, что реальное распределение концентрации свободных носителей и их энергетический спектр в канале HEMT-структуры могут быть получены из численного моделирования результатов профилирования на основе самосогласованного решения одномерных уравнений Шредингера и Пуассона (Рис. 1а).

В приборах данного типа двумерный проводящий канал, представляющий собой квантовую яму, и прилегающие к нему слои широкозонных полупроводников изготавливаются из нелегированного материала, что обеспечивает высокую подвижность свободных носителей заряда в канале n2D(z) (Рис 1b). Носители заряда, заполняющие канал и обуславливающие его проводимость, создаются за счет легирования мелкими примесями пространственно отделенных от канала слоев широкозонного полупроводника. Для увеличения проводимости канала уровень легирования и толщина этих слоев повышается, однако при этом необходимо избегать шунтирования канала этими сильно легированными областями. Поэтому при разработке НЕМТ-структур необходимо контролировать перераспределение свободных носителей заряда между двумерным каналом и неоднородно легированными широкозонными барьерами. Для определения параметров НЕМТ-структур наряду с CV-профилированием применялся комплекс взаимодополняющих методов, включающий в себя просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ) и вторичную ионную масс-спектрометрию (ВИМС), которые дают информацию о толщинах слоев (Рис. 2) и о распределении по глубине матричных и примесных атомов в НЕМТ-структурах (Рис. 3), соответственно. Показано, что электрохимическое вольт-емкостное профилирование сложных гетероструктур с квантоворазмерными слоями, сопровождаемое численным моделированием результатов профилирования на основе самосогласованного решения одномерных уравнений Шредингера и Пуассона, может успешно использоваться для





Рисунок 6. Структура с МП InxGa1 xAs/GaAs. (а) Изображение поперечного сечения, полученное методом ПЭМ с использованием рефлекса g = (002) и характерная картина ЭМ (на вставке), (b) зависимость изменений параметра решетки (m – профиль, m=∆a/a) по глубине.



Рисунок 7. Dp RSM-карта вокруг узла (224) GaAs. RSM представлена изолиниями равной интенсивности, m профиль показан стрелками с шагом 50 нм.

получения надежной информации о геометрических и электронных параметрах многослойных структур. В частности, указанный метод позволяет определять концентрацию носителей заряда в канале HEMT непосредственно после выращивания многослойной гетероструктуры, то есть на стадии, предшествующей изготовлению самого транзистора.

Посредством ПЭМ исследованы особенности микроструктуры узкозонных квантовых точек (КТ) InSb на поверхности (001) InAs [2]. На ПЭМ изображениях, полученных в двулучевых дифракционных условиях, образцов с поверхностными КТ больших размеров (высота 9–10 нм, диаметр 38-50 нм) в планарной геометрии выявлены сильные искажения муарового контраста (Рис. 4). На ПЭМ изображениях высокого разрешения (ВРЭМ) в поперечном сечении было обнаружено наличие дефектов упаковки внутри КТ (Рис. 5) и дислокаций на границе КТ/подложка. Для объяснения природы наблюдаемого контраста методом конечных элементов проведен расчет упругих полей и полей смещений в КТ, содержащей дислокацию Франка. В результате расчета для КТ в форме цилиндра, усеченного конуса и шарового сегмента показано, что: а) форма КТ имеет весьма незначительное влияние на распределение смещений, б) введение дислокации Франка изменяет распределение смещений в КТ таким образом, что на краю КТ величина деформации уменьшается почти на 30%.

На основе расчета полей смещений в КТ, содержащих дислокацию Франка, проведено моделирование электронно-микроскопических изображений в рамках подхода Хови-Уэлана. Найдено, что введение дислокации в КТ приводит к различным искажениям картины муара. Сравнение моделированных изображений с экспериментальными позволило объяснить обнаруженные особенности контраста КТ InSb на InAs (001) присутствием в ней дислокации Франка.

Предложен метод диагностики толстых (1 мкм и более) градиентных слоев с переменным составом и степенью релаксации по глубине слоя, основанный на анализе карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве в сопоставлении с профилированием параметров кристаллической решетки по глубине методом электронной микродифракции (ЭМ) [3]. Информативность предложенной методики продемонстрирована на примере слоя ln_xGa_{1-x}As/GaAs с линейным изменением *x* по глубине (Рис. 6). Комплексное представление дифракционных данных в виде профилированной по глубине карты обратного пространства (Dp RSM-карты) позволяет учесть дополнительную релаксацию, возникающую при утонении образцов для электронно-микроскопических исследований (Рис. 7). Получение зависимости параметров элементарной ячейки слоя от глубины его залегания в структуре (профилирование параметра решетки (а) по глубине) важно при решении ряда технологических задач, связанных, например, с созданием метаморфных малодефектных буферных слоев с параметрами *a*, промежуточными относительно значений для соединений АЗВ5, обычно используемых в метаморфных подложках (МП). Применение концепции метаморфного роста позволяет значительно улучшить характеристики гетероструктур, выращиваемых на рассогласованных подложках, а также расширить функциональные возможности для конструирования зонной структуры в целях разработки новых типов приборных гетероструктур. Данный комплекс методов был выбран потому, что методом ЭМ можно непосредственно наблюдать изменение параметров решетки слоя по толщине с точностью до $\Delta a/a = 5x10^{-4}$ и пространственным разрешением до 10 nm.

Однако, в случае напряженных структур, на точность измерений оказывает влияние изменение напряжений, возникающее при получении тонких срезов образцов (около 100 nm), используемых в ПЭМ. В отличие от методов ПЭМ, метод рентгеновской дифрактометрии (РД) является неразрушающим и при правильном выборе моды сканирования позволяет характеризовать напряжения и определять состав слоев с высокой точностью. В комплексе методы ЭМ и РД обеспечивают получение полной и достоверной информации об изменениях с глубиной этих параметров слоя. Разработана методика визуализации одиночных слоев оксида графена на поверхности кремниевой подложки с помощью регистрации сигнала вторичных электронов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Рис. 8) [4]. Показано, что изменения контраста СЭМ изображений зависят от количества слоев оксида графена. Данные результаты были подтверждены методом атомно-силовой микроскопии (Рис. 9).

Разработана методика измерения спектра структурных флуктуаций свободного графена по картинам электронной дифракции в ПЭМ [4] (Рис. 10). Данная методика позволяет измерять не только статические структурные флуктуации, но и связанные с изгибными фононами, таким образом, предоставляя наиболее полную информацию о динамике решётки графена, недоступную для прямых методов измерения. С помощью данной методики был измерен спектр структурных флуктуаций в диапазоне волновых векторов 0.1–4 нм⁻¹. Показано, что в пределе больших волновых векторов зависимость спектра приближается к



Рисунок 8. СЭМ изображение плёнки, полученной осаждением оксида графена из водной суспензии на поверхность кремния.







Рисунок 10. (а) Схема измерения распределения интенсивности I(q) на картинах электронной дифракции, (b) Измеренные зависимости I(q) от g².



Рисунок 11 — Полученные спектры автокорреляционной функции рельефа. В правой части H(q) подчиняется закону T/кq4, в то время как при более низких значениях волновых векторов зависимость гораздо слабее. описываемой гармоническим приближением (Рис. 11). Это позволило измерить изгибную жёсткость свободного графена, которая оказалась равной 1.2±0.4 эВ, что находится в хорошем согласии с результатами теоретических расчётов. Обнаружено, что при волновых векторах < 3 нм⁻¹ зависимость спектра становится слабее, что находится в соответствии с расчётами методом молекулярной динамики и уточняет упрощённые расчёты и теоретические модели. Более слабая зависимость обнаруживается при q<1 нм⁻¹. Это объясняется влиянием взаимодействия носителей заряда со структурными флуктуациями. Обнаруженная зависимость от размера свободной области лежит в пределах погрешности измерений, что связано с выявленной слабой зависимостью спектра структурных флуктуаций в области малых волновых векторов. Показано, что концентрация свободных носителей в слоях графена может значительным образом модифицировать спектр структурных флуктуаций [5].

Особенностью ЦКП является комплексный подход к решению междисциплинарных задач фундаментальной, прикладной, отраслевой науки и промышленности. В ЦКП сформирован и развивается диагностический комплекс современного аналитического оборудования. Он обеспечивает получение количественно-точной информации об элементном, химическом, фазовом составе, параметрах реальной кристаллической решетки и электронной структуры, типе, концентрации и локализации дефектов, оптических, электрофизических, геометрических и других параметрах и характеристиках любых материалов и твердотельных структур. Характерной особенностью приборных наногетероструктур является наличие в них квантоворазмерных слоев с толщинами порядка нескольких нанометров. Это предъявляет серьезные требования к таким метрологическим параметрам диагностических методов, как чувствительность и пространственное разрешение, требует развития методического и программного обеспечения. Для получения достоверной информации о таких объектах необходимо использовать не отдельные методы, а комплекс взаимодополняемых и взаимопроверяемых методов. Кроме того, серийное производство и широкое применение современных приборов на основе наногетероструктур выдвигает и новые требования к метрологическому обеспечению измерения их функциональных характеристик. В рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 — 2012 годы» в ЦКП был выполнен проект «Создание стандартного образца (CO) состава и свойств многослойных наногетероструктур для метрологического обеспечения измерений профилей состава функциональных покрытий и приборов наноэлектроники на гетероструктурах» по разработке и созданию «Стандартного образца состава и свойств многослойной гетероструктуры на основе твердых растров GaAs-AlAs наноразмерных толщин (CO ГС-СР)» и «Стандартного образца состава и свойств многослойной гетероструктуры на основе твердых растров GaAs-AlAs наноразмерных толщин (CO ГС-СР)» и «Стандартного образца состава и свойств многослойной гетероструктуры на основе твердых растров GaAs-AlAs наноразмерных толщин и дельта-слоев AlAs (CO ГС-Д)». Ипользуемые для измерений в ЦКП приборы внесены в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации и ежегодно проводится их метрологическая поверка.

Публикации

 Брунков П.Н., Гуткин А.А., Рудинский М.Э., Ронжин О.И., Ситникова А.А., Шахмин А.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Егоров А.Ю., Земляков В.Е., Конников С.Г., Электрохимическое вольт-емкостное профилирование концентрации свободных носителей заряда в HEMT-гетероструктурах на основе соединений InGaAs/AIGaAs/GaAs. ФТП, 2011, T.45, C.829-835.

- Bert N.A., Nevedomskiy V.N., Sokura L.A., Features of microstructure of InSb quantum dots on InAs substrate. J. Phys.: Conf. Ser., 2015, V.586, 012004.
- Байдакова М.В., Кириленко Д.А., Ситникова А.А., Яговкина М.А., Климко Г.В., Сорокин С.В., Седова И.В., Иванов С.В., Романов А.Е., Комплексное использование дифракционных методов при профилировании по глубине параметра кристаллической решетки и состава градиентных слоев InGaAs/GaAs. Письма ЖТФ, 2016, Т.42, С.40-48.
- Dideykin A.T., Aleksenskiy A.E., Kirilenko D.A., Brunkov P.N., Goncharov V., Baidakova M.V., Sakseev D., Vul' A.Ya., Monolayer graphene from graphite oxide. Diamond and Related Materials, 2011, V.20, PP.105-108.
- Kirilenko D.A., Brunkov P.N., Measuring the height-toheight correlation function of corrugation in suspended graphene. Ultramicroscopy, 2016, V.165, PP.1-7.
- Kirilenko D.A., Gorodetsky A.A., Baidakova M.V., Influence of charge carriers on corrugation of suspended graphene. Solid State Commun., 2018, V.270, PP.1-5.

УНУ СФЕРИЧЕСКИЙ ТОКАМАК ГЛОБУС-М2

Базовое структурное подразделение — Лаборатория физики высокотемпературной плазмы. Разработки также ведутся с участием Лаборатории процессов атомных столкновений, Циклотронной лаборатории, Лаборатории квантовой электроники.

Сферический токамак Гобус-М2 (модернизированный токамак Глобус-М) является уникальной научной установкой (УНУ), предназначенной для комплексных исследований свойств высокотемпературной плазмы, удерживаемой в магнитной конфигурации с малым аспектным отношением. Современная концепция сферического токамака получила интенсивное развитие в ряде ведущих мировых исследовательских центров, а установки данного типа рассматриваются в качестве привлекательной потенциальной основы для создания устройств типа термоядерного источника нейтронов.

Работы по созданию сферического токамака

Глобус-М были начаты в начале 90-х годов в Лаборатории физики высокотемпературной плазмы по инициативе В.Е. Голанта. Проектная документация камеры и электромагнитной системы была разработана в НИИЭ-ФА им. Д.В. Ефремова, где также был изготовлен ряд элементов конструкции. Изготовление и сборка токамака были выполнены на Государственном предприятии «Ленинградский Северный завод». Одновременно были введены в строй сетевые источники питания суммарной мощностью 125 МВт и построен экспериментальный зал площадью 300 м², примыкающий к корпусу «Б». Помимо сооружения самого токамака были созданы системы



Рисунок 1. Внешний вид установки Глобус-М2

для дополнительного нагрева плазмы и многочисленные диагностические и технологические системы, работа над которыми непрерывно продолжается.

После ряда успешных экспериментов, выполненных в период 2000-2010, был сделан вывод о необходимости увеличения магнитного поля, в котором удерживается плазма, и протекающего по ней тока в два — два с половиной раза. Были начаты работы по созданию новой электромагнитной системы, которые завершились созданием модернизированной установки Глобус-М2 (см. рисунок 1). Ее физический пуск осуществлен в апреле 2018 года.

Основные инженерно-физические параметры токамака Глобус-М2:

- большой радиус плазмы 0.36 м
- малый радиус плазмы 0.24 м
- аспектное отношение тора 1.5
- объем плазмы ≤ 0.6 м3
- вытянутость плазмы ≤ 2
- треугольность плазмы 0.1-0.5
- ток плазмы ≤ 0.5 МА
- тороидальное магнитное поле ≤ 1 Тл.

 Сферический токамак Глобус-М является сложной электрофизической установкой, многие элементы которой подвержены большим механическим и тепловым нагрузкам. Основное используемое оборудование является уникальным, а для его создания потребовалось применение современных материалов и сложных технологий. Следует отметить, что большинство созданных



Рисунок 2. Обращенная к плазме поверхность купола камеры

устройств разработано и изготовлено на отечественных предприятия, а их заметная часть — в Физико-техническом институте. В 2009 году группа разработчиков сферического токамака Глобус-М была удостоена Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники. Опыт сооружения установки Глобус-М был всецело использован при сооружении установки Глобус-М2.

К основным направлениям научной деятельности установок Глобус-М и Глобус-М2 относятся: исследование удержания частиц и энергии, исследование устойчивости плазмы, разработка и исследование методов дополнительного нагрева плазмы и генерации безындукционного тока, получение и исследование



Рисунок 3. Расчетные траектории пролетных ионов с энергией 25 кэВ в магнитном поле 0.4 Тл.

плазмы с предельной плотностью и давлением; получение и исследование режимов с улучшенным удержанием (Н-мода, режимы с самогенерацией тока плазмы, режимы с внутренними транспортными барьерами); разработка методов получения диверторных и лимитерных магнитных конфигураций; исследование процессов в периферийной плазме; разработка числовых и аналоговых методов автоматического управления параметрами плазмы (положение плазменного шнура, ток плазмы, форма плазмы и др.); изучение





взаимодействия плазмы с обращенной к плазме поверхностью; разработка методов защиты обращенных к плазме поверхностей и исследование материалов для облицовки вакуумной камеры; разработка методов диагностики плазмы; разработка новых способов подачи топлива в горячую зону шнура; разработка систем сбора и обработки данных с расчетом одновременного



при инжекции в плазму пучка атомов

доступа большого числа удаленных пользователей.

В настоящее время около 90% обращенной к плазме поверхности покрыто плитками графита марки РГТ с низкой пористостью и коэффициентами распыления. Такой тип графита применяется в сферическом токамаке впервые в мире. Под плитками расположено несколько сот диагностических датчиков различного назначения. На Фото 2 показана внутренняя поверхности камеры. Также проводятся испытания некоторых сортов вольфрама, рекомендованных к использованию в экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР.

Основные достигнутые результаты связаны с применением мощных источников дополнительного нагрева плазмы и генерации безындукционного тока. На установке имеется инжектор атомного пучка водорода или дейтерия с энергией частиц до 30 кэВ при мощности до 1 МВт. Готовится к экспериментам второй инжектор с энергией атомов до 50 кэВ и мощностью также до 1 МВт. Одновременное применение двух инжекторов позволяет увеличить удельную мощность нагрева в расчете на единицу объема плазмы до рекордного уровня масштаба 4 МВТ/м².

Вторым используемым способом дополнительного нагрева плазмы является высокочастотный нагрев в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса. Генератор с перестраиваемой частотой в диапазоне 7-10 МГц и выше позволяет вводить в плазму излучение мощностью несколько сот киловатт. Для ввода излучения имеются две антенны с электростатическими экранами. Проблема нагрева плазмы атомными пучками и ИЦР излучением в сферическом токамаке связана с появлением ионов высокой энергии с траекторими больших размеров (см. рисунок 3), которые слабо удерживаются в низком магнитном поле. Значительное снижение их потерь ожидается в модернизированной установке Глобус-М2.

Для экспериментов по безындукционному старту тока плазмы и замещения индукционного тока безындукционным используются две системы для ввода в плазму излучения в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса 900 МГц и 2.45 ГГц. Излучение на частоте 2.45 ГГц вводится с помощью многоволноволного грилла с поворотным механизмом, что позволяет проводить эксперименты с замедлением волн как в тороидальном, так и полоидальном направлении.

В проведенных исследованиях были продемонстрированы основные преимущества концепции токамака с малым аспектным отношением. В низком тороидальном магнитном поле 0.4 Тл были получены МГД устойчивые разряды с большим током плазмы 250 кА и высокой средней плотностью более 1×10²⁰ м⁻³. Глобус-М — единственная российская установка, в которой плазма удерживается в конфигурациях диверторного типа с вытянутым сечением, а ее границей является магнитная сепаратриса. Фотография поперечного сечения плазмы и результат реконструкции



Рисунок 7 — Поведение параметров плазмы в эксперименте с безындукционным стартом тока

ее границы по данным магнитных измерений показаны на рисунке 4. В экспериментах пространственное положение плазмы контролируется автоматическими системами с отрицательной обратной связью.

Несмотря на плохое удержание быстрых ионов, в экспериментах с инжекцией в плазму атомного пучка был получен значительный нагрев (см. рисунок 5). Было показано, что величина ионной температуры зависит от радиального положения плазмы и зазора между плазмой и стенкой со стороны слабого магнитного поля, что обусловлено характером удержания ионов пучка. Установлено, что на удержание быстрых ионов влияет возбуждение неустойчивостей в альфвеновском диапазоне частот 50-200 кГц. Такие неустойчивости возбуждаются при инжекции пучка вследствие нарушения тепловой функции распределения частиц и приводят к примерно 25% спаду нейтронного выхода, возникающего при взаимодействии пучка дейтерия с дейтериевой плазмой. Было показано, что в магнитном поле 0.4 Тл суммарная доля безындукционного тока (bootstrap ток и собственно ток, генерируемый пучком) достигла 20% от полного тока плазмы.

Впервые в сферическом токамаке были проведены эксперименты по ИЦР нагреву на основной гармонике добавки водорода в плазму дейтерия. По причине сильного перепада тороидального магнитного поля вдоль большого радиуса тора (примерно в 5 раз в пределах вакуумной камеры) в плазме одновременно присутствуют несколько циклотронных гармоник, а ширина резонансного слоя становится узкой. При этом поглощение электромагнитного излучения в резонансном слое осуществляется за несколько проходов, а стальная вакуумная камера играет роль резонатора. В этих условиях был достигнут значительный нагрев ионов плазмы при низком уровне вводимой мощности излучения масштаба 0.15 МВт (см. рисунок 6). Примечательно, что в отличие от ИЦР нагрева в обычных токамаках рост ионной температуры наблюдался не только при малой добавке водорода, но и в широком диапазоне $C_{\mu} = n_{\mu}/(n_{\mu}+n_{\mu}) = (10-70)\%$, где n_{μ} , nD — плотность ионов водорода и дейтерия.

Одной из критических проблем стационарного режима работы термоядерных устройств является безындукционный старт и дальнейшее поддержание тока плазмы без использования обмотки индуктора. В экспериментах на установке Глобус-М для безындукционного старта тока использовался генератор мощностью 100 кВт, работающий на частоте 900 МГц. Для ввода излучения в плазму использовалась антенна типа «гребенка». Был достигнут подъем тока плазмы от нуля до величины 17 кА при вложенной в плазму мощности всего 20-30 кВт (см. рисунок 7). Измеренные значения средней плотности электронов находились в диапазоне (1÷3)×10¹⁸ м⁻³, а температуры электронов 10÷20 эВ. Для соблюдения условий равновесия плазмы вдоль большого радиуса в период подъема тока прикладывалось внешнее вертикальное магнитное поле В. Обработка данных измерений магнитных потоков вблизи границы плазмы показала формирование замкнутой магнитной конфигурации, вытянутой в вертикальном направлении.

В первых экспериментах по безындукционной генерации тока излучением на частоте 2.45 ГГц был применен способ полоидального замеделения волн, когда вектор электрического поля волны ориентирован в полоидальном направлении. Поскольку ток плазмы в разряде стабилизирован автоматической системой управления, то эффект генерации безынндукционного тока регистрировался по спаду приложенного в плазме индукционного электрического напряжения. При полном токе плазмы 200 кА спад напряжения составлял (10÷20)% от исходного значения, что эквивалентно величине генерируемого безындукционного тока 20÷40 кА. Оценка эффективности генерации тока дает величину (0.2÷0.3)×10¹⁹ АВт⁻¹м⁻³, что близко к эффективности генерации в обычных токамаках.

Исследовано влияние плазменных потоков на предварительно «поврежденные» вольфрамовые пластины. Пластины вольфрама были облучены электронным пучком или плазменной струей высокой плотности, а затем установлены в диверторную область токамака. Уровень повреждений поверхности пучком и плазменной струей эквивалентен 100 или 1000 кратным воздействиям ELM-событий (ELM — Edge Localized Mode) в токамаке ITER. Обнаружено, что поверхность поврежденного вольфрама нагревается в период импульса токамака до более высокой температуры по сравнению с неповрежденной поверхностью, что связано появлением на поврежденной поверхности рыхлого слоя с пониженной теплопроводностью.

УНУ Глобус-М2 входит в состав Федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях». Исследования и разработки на УНУ Глобус-М2 осуществляются в рамках технологической платформы «Управляемый термоядерный синтез» и связаны с решением Приоритетной научной задачи № 2 «Исследования и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики».

Публикации

- Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 9. С. 58 — 62.
- V. B. Minaev, V. K. Gusev, N. V. Sakharov, et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 066047 (9pp)
- V. K. Gusev, R. M. Aminov, A.A. Berezutskiy, et al. Nucl. Fusion 51 (2011) 103019 (12pp).
- V. V. Dyachenko, O. N. Shcherbinin, E. Z. Gusakov, et al. Nucl. Fusion 55 (2015) 113001 (7pp)

УНИКАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ УСТАНОВКА «ЦИКЛОТРОН ФТИ ИМ. А. Ф. ИОФФЕ»

Базовое структурное подразделение — Циклотронная лаборатория

Уникальная научная установка «Циклотрон ФТИ им.А.Ф. Иоффе» организована в 2013 г. на базе циклотронной лаборатории ФТИ и старейшего из «больших» работающих ускорителей. Конструирование циклотрона ФТИ началось в 1937 г., фундамент циклотрона был заложен в сентябре 1939 г., однако работы по запуску циклотрона были остановлены в июне 1941 года. В 1942 г., после принятия принципиального решения о создании ядерного оружия (Распоряжение ГКО СССР №2352 сс от 28 сентября 1942 г.), усилия по достройке циклотрона ФТИ были возобновлены. И уже спустя полтора года, после издания Постановления ГКО №7357сс/ов от 19 января 1945 г. «О завершении строительства циклотронной лаборатории...» в ноябре 1946 г., под руководством первого заведующего лабораторией Д. Г. Алхазова циклотрон ФТИ был запущен. После выполнения необходимых работ в рамках атомного проекта циклотрон ФТИ был переориентирован на выполнение «мирных» научных и прикладных задач.



Если первоначально циклотрон предназначался для ускорения пучков дейтронов, то новые задачи потребовали существенного расширения его возможностей в плане ускоряемых ионов и улучшения основных характеристик выводимых пучков. С этой целью ускорительный комплекс неоднократно и серьезно мо-



дернизировался. Вплоть до 2008 г. оптимизировалась конструкция источника ионов циклотрона, в 1975 г. совместно с НИИЭФА были проведены исследования и модернизация системы формирования магнитного поля циклотрона, с 1984 года по 2008 год неоднократно модернизировался высокочастотный генератор циклотрона. Этот процесс завершился в 2008 году установкой нового генератора, изготовленного ГК «Тира»


и работающего в диапазоне частот от 3 до 12 МГц. В 2012 году вакуумная система циклотрона полностью переведена на безмасляную откачку.

Весь комплекс проведенных работ позволил поднять зарядность ускоряемых ионов (до 8+ в случае Ar) и, тем самым, увеличить энергии выводимых пучков многозарядных ионов, устранить неоднородности и оптимизировать топографию магнитного поля, значительно упростить и улучшить настройку высокочастотного генератора, улучшить вакуум в системе ускорителя и др. Это и обусловило уникальные характеристики пучков выводимых ионов, которые приведены в таблице.

Тип иона	Диапазон возможных энергий, МэВ	Диапазон пробегов в кремнии, мкм
Протоны (р)	0,9 — 6,0	14 — 300
Гелий (α частицы)	3 — 26	12 — 320
Углерод (С)	8 — 47	7,5– 58
Азот (N)	9,5 — 62	8 — 61
Кислород (О)	10,5 — 75	8 — 63
Неон (Ne)	13 — 81	8 — 46
Аргон (Ar)	27 — 55	9 — 15

(В последнем столбце таблицы приведены величины пробегов ионов в кремнии, демонстрирующие большие возможности ускорителя в задачах модифицирования различных материалов). На фотографии 1 представлен общий вид циклотрона ФТИ им.А.Ф. Иоффе с примыкающим к нему начальным участком ионопровода.

На различных пучках ускоренных ионов в предшествующие годы решались как фундаментальные, так и прикладные задачи. К первым относятся продолжительные исследования структуры атомного ядра методами гамма – спектроскопии на пучках ионов малых и средних энергий. Большой цикл работ по кулоновскому возбуждению ядер в 1968 году был удостоен Государственной премии. Позднее, вплоть до 2000-х годов эти исследования с применением допплеровских методов измерения времен жизни возбужденных состояний ядер по инициативе А.А. Пастернака были



Фото 4. Вакуумная камера с устройством, позволяющим устанавливать шесть полупроводниковых пластин с диаметром 150 мм.

распространены на высоковозбужденные состояния, образующиеся в результате ядерных реакций.

За последние 10-15 лет на основе улучшенной экспериментальной базы получили дальнейшее развитие и прикладные работы. В первую очередь, это начатые в 60-70 х годах усилиями Г.М.Гусинского совместно с другими заинтересованными лабораториями ФТИ исследования по модифицированию твердотельных (полупроводниковых и полимерных) структур. Если ранее при облучении полупроводников использовались в основном пучки протонов, применение более тяжелых ионов, в частности, азота и аргона, позволили корректировать дополнительные, весьма критические параметры приборов силовой электроники. На фото 2 представлена одна из модернизированных вакуумных камер для облучения полупроводниковых структур размером до 58 мм. Наиболее существенные результаты по коррекции параметров силовых полупроводниковых приборов изложены в работах [1, 2, 3].

В интересах предприятий электронной промышленности, таких как ОАО «Ангстрем», ВЗПП «Микрон» и др. была разработана и изготовлена установка для облучения крупноразмерных полупроводниковых образцов (кремниевых пластин со сформированными чипами) диаметром до 200 мм. Установка представлена на фото 3. На фото 4 представлена вакуумная камера установки с устройством размещения и позиционирования шести мишеней диаметром 150 мм или четырех пластин (на квадратном держателе) диаметром 200 мм.

В области технологии трековых мембран, получаемых с помощью облучения ионами аргона полимерных пленок, наряду с ее технической реализацией для полиэтилентерефталата толщиной 10 — 12 мкм, получена трековая мембрана методом двустороннего облучения исходной пленки ионами с энергией, которой соответствует пробег иона меньше толщины пленки [4]. При этом, прочность такой мембраны больше, чем при радиционном одностороннем облучении. Также проводились исследования по расширению областей применения трековых мембран. Так, помимо известных медицинских и биотехнологических задач (плазмафереза крови, санитарно-бактериологического анализа, в бытовых фильтрах для воды и др.), полученные результаты позволили рекомендовать трековую мембрану к использованию в различных комплексных схемах водоочистки и водоподготовки [5]. На фото 5 представлены фрагмент ионопровода и примыкающая к нему специальная вакуумная камера с лентопротяжным механизмом для работ в области мембранных технологий.

В современном состоянии циклотрон ФТИ с его пучками и вторичным излучением, обусловленным

реакциями, вызываемыми этими пучками, оказался удобен для моделирования различных процессов. В частности, ускоренные пучки ионов позволяют моделировать космическое излучение и исследовать его влияние на различные объекты, а также, моделировать процессы, происходящие в высокотемпературной плазме токомаков.

Тематика одной из групп лаборатории непосредственно связана с последним фундаментальным направлением и состоит в разработке ряда диагностик для установок магнитного удержания высокотемпературной плазмы.



За последние 10 лет по итогам работ, проведенных в лаборатории, опубликовано 95 научных работ и получено три патента.

Публикации

- Солдатенков, В.А. Козлов, М.Ф. Кудояров. Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей IV Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СП.Г. ТУ «ЛЭТИ», 2015, Том 2, С. 74-78. Применение протонного облучения для точной коррекции динамических характеристик сверх-быстродействующих высокочастотных силовых GaAs-A3B5 p-i-n диодов.
- Иванов П.А., Кудояров МФ., Козловский М.А., Потапов А.С., Самсонова Т.П. ФТП, т.50, 7 с. 937-940, 2016. Полуизолирующие слои 4H-SiC, полученные имплантацией высокоэнергетичных (53 МэВ) ионов аргона в эпитаксиальные пленки п-типа проводимости.
- Иванов. П.А. Потапов. А.С., Кудояров. М.Ф., Козловский. М.А., Самсонова. Т.П. Письма ЖТФ, т.44, 6 с.11-16, 2018.

Влияние термообработки на электрические характеристики полуизолирующих слоев, полученных с помощью облучения n-SiC высокоэнергетическими ионами аргона.

- Кудояров. М.Ф., Козловский. М.А., Патрова. М.Я., Потокин. И.Л., Анкудинов. А.В. Письма ЖТФ, т.42, 13 с. 87-95, 2016. Трековые мембраны на основе пленки из полиэтилентерефталата толщиной 20 mum, полученные на пучке ионов аргона с пробегом меньше толщины пленки.
- Л.М. Молодкина, Д.Д. Колосова, Е. И. Леонова, М.Ф. Кудояров, М.Я. Патрова, Ю.В. Ведмецкий. Мембраны и мембранные технологии. т. 2, N1, с.41-48, 2012. Трековые мембраны в доочистке бытовых сточных вод.

КОМПЛЕКС ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Базовые структурные подразделения, развивающие технологии МПЭ и ГФЭ МОС:

лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур

лаборатория Физики полупроводниковых гетероструктур,

лаборатория Спектроскопии твердого тела,

лаборатория Фотоэлектрических преобразователей,

лаборатория Инфракрасной оптоэлектроники,

лаборатория Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей

Функционирующий в ФТИ им. А.Ф. Иоффе комплекс эпитаксиальных технологий, включающий современные зарубежные и отечественные установки молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) (6 установок МПЭ) и газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭ МОС)(10 установок ГФЭ МОС), является уникальным для России по спектру исследуемых материалов и выращиваемых эпитаксиальных гетероструктур (полупроводниковых, диэлектирических, композитных) с целю разработки и создания новой элементной базы полупроводниковой фотоники, СВЧ-электроники, многопереходной фотовольтаики и спинтроники. Данные технологические исследования и разработки соответствуют передовому мировому уровню, а в отдельных областях превышают его. Современный эпитаксиальный технологический комплекс является одной из основных составных частей научно-технологического облика Института, составля-

ющих его мировую известность. На технологическом оборудовании данного комплекса учеными и технологами ФТИ им. А.Ф.Иоффе ведутся разработки, признанные международным и российским научными сообществами и востребованные российскими промышленными компаниями, работающими в соответствующих секторах наукоемкой инновационной экономики.

Исследования и разработки в области МПЭ аисторически были инициированы в лаборатории Ж.И.Алферова, в группе П.С. Копьева в 1979г., где и появилась одна из первых в России установок Riber 1000 (Франция). В 1987 г. с помощью МПЭ был созданы уникальные лазерные диоды на основе ДГС РО AlGaAs/GaAs с квантовой ямой, ограниченной апериодической короткопериодной сверхрешеткой, с рекордно низкой пороговой плотностью тока (~40 A/см² при 300K) [1]. Данный мировой рекорд для полупроводниковых лазеров продержался более 7 лет. Впоследствии в 1988-1990 гг. были разработаны и созданы первые в СССР квантоворазмерные гетероструктуры (Al,Ga)As/GaAs с двумерным электронным газом для применений в HEMT-транзисторах [2].

В настоящее время парк современного эпитаксиального оборудования МПЭ в существенной степени сконцентрирован в лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур (зав. лаб. С.В. Иванов) и используется для разработки полупроводниковых наногетероструктур для фотонных применений в широком спектральном диапазоне (230 нм — 5 мкм), включая и исследования в области квантовой фотоники. В распоряжении лаборатории имеется несколько современных технологических установок МПЭ зарубежного и отечественного производства.

На рисунке 1 представлена установка МПЭ RIBER-32P (Riber, France) класса "research", используемая для выращивания гетероструктур узкозонных соединений A³B⁵ (AlGaAsSb, InGaAsSb, InAsSb).

Сверхвысоковакуумная (СВВ) ростовая камера установки (предельный вакуум 10⁻¹⁰ торр) имеет горизонтальную геометрию и содержит 8 источников молекулярных пучков, в том числе вентильный источник с крекинговой зоной для мышьяка. Установка оснащена автоматизированной системой управления технологическим процессом, а также современными диагностическими системами контроля процесса роста, включающими систему дифракции отраженных быстрых электронов, ИК-пирометр и квадрупольный масс-спектрометр для анализа остаточной атмосферы.



Рисунок 1 — Технологическая установка МПЭ RIBER-32Р для выращивания гетероструктур узкозонных соединений АЗВ5 в системе (Al,Ga,In)(As,Sb).

Максимальный диаметр подложек 75мм. Установка была полностью переоборудована в 2002 году. Основное направление исследований — метаморфные гетероструктуры в системе AlGaInAs с KЯ InAs/InSb, InAs и InGaAs, выращиваемые на подложках GaAs для оптоэлектроники среднего ИК диапазона (2-5 мкм) (лазеры, светодиоды и фотоприемники) и НЕМТ-транзисторов для СВЧ-электронных применений [3,4]. Также ведутся разработки гетероструктур AlInSb/InSb для фотоприемников среднего ИК диапазона и датчиков Холла.

Установка МПЭ STE3526 (производство компании ЗАО «Научное и технологическое оборудование», г. Санкт-Петербург) (рис. 2) является последним по времени приобретением лаборатории (2009 г.). Это современное оборудование класса "R&D" с максимальным диаметром подложки 100 мм. Установка содержит две СВВ камеры роста с блоками молекулярных источников для выращивания полупроводниковых соединений А³В⁵ (Al,Ga,In)As и широкозонных полупроводниковых соединений A²B⁶ (Zn,Mg,Mn,Cd)(S,Se,Te), по 8 источников молекулярных пучков в каждой. В качестве источников селена и мышьяка используются вентильные источники с высокотемпературным разложителем фирмы Veeco. Камеры роста имеют прогрессивную вертикальную ростовую геометрию, наиболее часто применяемую в настоящее время ведущими производителями подобного оборудования и используемую в промышленных установках. СВВ камеры подготовки, транспортировки и хранения образцов позволяют осуществлять передачу эпитаксиальных структур из одной ростовой камеры в другую, сохраняя чистоту поверхности на атомном уровне. Каждая камера роста установки оснащена автоматизированной системой управления технологическим процессом, а также современными диагностическими системами контроля роста, включающими систему дифракции отраженных быстрых электронов, ИК-пирометр и квадрупольный масс-спектрометр для анализа остаточной атмосферы.

Основные направления разработок: создание



Рисунок 2. Двухреакторная установка МПЭ STE3526 (ЗАО НТО, Россия) для выращивания гетероструктур полупроводниковых соединений А³В⁵, широкозонных соединений А²В⁶ и монокристаллических гибридных гетероструктур А³В⁵/А²В⁶.

наногетероструктур с квантовыми точками AlGaAs/ InAs, ZnMgSSe/CdSe, ZnMgSeTe/CdTe для источников одиночных и неразличимых фотонов в широком спектральном диапазоне (500-1300 нм), разработка эффективных лазерных гетероструктур A²B⁶ с оптической и электронной накачкой видимого желто-зеленого спектрального диапазона, в том числе и для создания интегральных инжекционных лазерных конвертеров [5].



Рисунок 3. Установка МПЭ Compact 21T ((Riber, France) для роста гетероструктур на основе Азнитридов (AlGaInN, легированных Si и Mg) методом плазменно-активированной МПЭ.

Ведутся также разработки по созданию гетероструктур для фотоники ближнего ИК диапазона, многопереходных солнечных элементов и гибридных полумагнитных структур А³B⁵/A²-Mn-B⁶ с прецизионным формировнием гетеровалентного интерфейса для исследований в области спинтроники.

Технологическая установка МПЭ Compact 21T (Riber, France) 2004 года выпуска (рис. 3) представляет собой образец последнего поколения зарубежных установок класса "research" и используется для разработки технологии плазменно-активированной МПЭ гетероструктур на основе АЗ-нитридов (AlGaInN, легированных Si и Mg). Установка содержит 11 источников молекулярных пучков, включая плазменный источник возбужденного азота синдуктивной обратной связью (Oxford Appl. Res.). Установка оборудована диагностическими системами контроля роста, включающими дифракцию отраженных быстрых электронов, оптическую лазерную рефлектометрию, ИК-пирометрию и многолучевой лазерный измеритель кривизны для всестороннего контроля процесса формирования наногетероструктур. Максимальный диаметр пластин 75 мм. лагодаря возможности управления составом и легированием эпитаксиальных слоев на моноатомном

уровне, данная установка позволяет выращивать многослойные структуры с квантовыми ямами в системе AlGaInN толщиной от 1 монослоя (0.25 нм) до нескольких нанометров. Основное направление исследований — разработка технологии низкодефектных гетероструктур в системе AIGaN для фотоники среднего и глубокого УФ диапазона (лазеры, солнечно-слепые фотоприемники, мощные спонтанные излучатели с электронно-лучевой накачкой), которые уникальны для России и находятся на уровне лучших зарубежных аналогов [5]. Также проводятся фундаментальные исследования по технологии самоорганизованного формирования регулярных массивов наноколонн ядро-оболочка в системе AlGaN с квантовыми дисками или точками на основе InGaN. Проведен комплекс приоритетных в мире исследований In-обогащенных твердых растворов InGaN и InN. Разработки по УФ приборам готовы к стадии ОКР и востребованы индустриальными партнерами.

Исследования и разработки в области ГФЭ МОС соединений на основе нитрида галлия впервые в России начались в 1996 г. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе сотрудниками лаборатории Физики полупроводниковых гетероструктур. В 2003 г. в ФТИ была запущена первая в России



Рисунок 4. Технологическая установка ГФЭ МОС AIX2000НТ компании Aixtron (Германия), для выращивания гетероструктур широкозонных III-N соединений.

промышленно-ориентированная установка ГФЭ МОС AIX2000HT компании Aixtron (Германия). За годы работы были исследованы процессы эпитаксиального роста сложных гетероструктур широкозонных III-N соединений (InGaAIN) на подложках сапфира и карбида кремния. Разработаны *in-situ* методы формирования самоорганизованных квантовых точек InGaN. Разработаны технологии эпитаксиального роста транзисторных гетероструктур и гетероструктур для светодиодов видимого диапазона и монолитных светодиодов. По результатам многолетней работы разработана и создана оригинальная установка ГФЭ МОС Dragon-125, которая позволяет создавать III-N гетероструктуры мирового уровня.

На рисунке 4 представлена промышленно-ориентированная установка ГФЭ МОС AIX2000HT компании Aixtron (Германия). Данная установка предназначена для одновременного эпитаксиального роста на шести подложках размером два дюйма.

В состав установки входят реакторный модуль, газовый шкаф, блок управления, генератор и скруббер, предназначенный для утилизации отходов установки. Модульная конструкция установки позволяет адаптировать ее под любое помещение. Установка имеет реактор планетарного типа, когда газы подаются в центр реактора и потоки направлены к его периферии. Значительное количество подложек, загружаемых в одном процессе, и малое время перезагрузки образцов обеспечивает высокую эффективность проведения эпитаксиальных процессов. Основное направление исследований — светодиодные гетероструктуры на основе широкозонных III-N соединений, выращиваемые на подложках сапфира для источников белого света [6,7]. Также ведутся разработки гетероструктур для транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Установка ГФЭ МОС Dragon-125 (рис. 5) разрабатывалась сотрудниками лаборатории Физики полупроводниковых гетероструктур в течение 2008-2011 гг. и предназначена для эпитаксиального роста гетероструктур широкозонных III-N соединений на одной подложке размером 100 мм или 3 дюйма или на трех подложках размером два дюйма. Разработанная установка имеет следующие характерные



Рисунок 5.

Установка ГФЭ МОС Dragon-125 для выращивания гетероструктур полупроводниковых III-N соединений (а) и многоточечная система отражения для контроля скорости роста и кривизны (б).

особенности. Давление в реакторе изменяется в диапазоне 100 – 1600 мбар, то есть позволяет работать при давлении выше атмосферного, что невозможно в коммерчески доступных установках ГФЭ МОС. Установка обладает горизонтальным реактором, металлическим корпусом реактора и индукционным нагревом. Диаметр зоны осаждения составляет 125 мм (3×2" или 1×4"). Установка оснащена собственной системой контроля эпитаксиального процесса, включающей 3 insitu датчика отражения (для контроля скорости роста и кривизны подложки). Используется собственное программное обеспечение.

Установка обеспечивает высокие скорости роста и малую длительность технологического процесса приборных эпитаксиальных структур [8]. Основные направления разработок: создание наногетероструктур для СВЧ транзисторов на подложках сапфира, кремния и карбида кремния. Ведутся разработки по созданию гетероструктур для приборов фотоники.

Публикации

- Zh.I. Alferov, A.M. Vasilev, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov, M.E. Lutsenko, B.Ya. Meltser, V.M. Ustinov, Sov. Tech. Phys. Lett. 14, 782-784 (1988).
- S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov, B.Ya. Meltser, M.Yu. Nadtochi, A.M. Vasilev, V.M. Ustinov, Phys. Stat. Sol. (a) **118**, 169-176 (1990).
- 3. M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov,

B.Ya. Meltser, M.A. Yagovkina, M.V. Baidakova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov, Appl. Phys. Express **10**, 121201-1-4 (2017).

- S. Ivanov, P. Kop'ev, Chapter 4, in "Antimonide-related strained-layer heterostructures", ed. by M.O. Manasreh, in Ser. "Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices", vol. 3, (Gordon & Breach Science Publishers, 1997), pp. 95-170.5. S.V. Ivanov, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, V.N. Jmerik, D. V. Nechaev, Chapters 8 & 25 in «Molecular Beam Epitaxy: From Research to Mass Production», Ed. M. Henini, Elsevier (2018) p.788.
- I. E. Titkov, A. Yadav, S. Yu. Karpov, A. V. Sakharov, A. F. Tsatsulnikov, T. J. Slight, A. Gorodetsky, E. U. Rafailov. Superior color rendering with a phosphorconverted blue-cyan monolithic light-emitting diode. Laser Photonics Rev. **10** (6), 1031–1038 (2016).
- D. Barettin, M. Auf der Maur, Aldo di Carlo, A. Pecchia, A. F. Tsatsulnikov, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, A. E. Nikolaev, M. Korytov, N. Cherkashin, M. J Hÿtch, S. Yu. Karpov Carrier transport and emission efficiency in InGaN quantum-dot based light-emitting diodes. Nanotechnology, **28** (27), 275201 (2017).
- В.В.Лундин, Д.В.Давыдов, Е.Е. Заварин, М.Г. Попов, А.В. Сахаров, Е.В. Яковлев, Д.С. Базаревский, Р.А. Талалаев, А.Ф. Цацульников, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. МОС-гидридная эпитаксия III-N светодиодных гетероструктур с малой длительностью технологического процесса. ПЖТФ, 41 (5), 9-17 (2015).

КОМПЛЕКС ПЛАНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Базовое структурное подразделение — Центр физики наногетероструктур.

Планарная технология является одним из ключевых этапов создания современных устройств микро – и оптоэлектроники, нанофотоники и спинтроники на основе полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе создан и функционирует комплекс постростового оборудования, позволяющий решать современные задачи расширения элементной базы в данных областях. На базе лабораторий Центра физики наногетероструктур (ЦФН) разрабатываются и реализуются технологические процессы создания на основе гетероструктур АЗВ5, А2В6, А3-нитридов, кремния и карбида кремния полупроводниковых устройств различного функционального назначения, в том числе светоизлучающих и мощных лазерных диодов, вертикально-излучающих лазеров, фотоприемников и фотодиодов, многофункциональных интегрально-оптических схем и модуляторов, оптических волноводов, солнечных элементов, источников однофотонного излучения.

Методы и технологии модификации поверхности полупроводниковых материалов с нанометровым разрешением являются важнейшим инструментом фундаментальных исследований в области наноэлектроники и нанофотоники, разработки новых типов полупроводниковых приборов и создания современных устройств различного функционального назначения. Группа постростовой технологии в ЦФН ФТИ им. А.Ф. Иоффе (рук. Н.Д. Ильинская) занимается разработкой планарных технологий изготовления широкого спектра полупроводниковых приборов на основе соединений A3B5 (GaAs, InAs, InP, GaSb), A2B6 (ZnSe, ZnS, ZnTe, CdSe, CdTe), Si, SiC, LiNbO3, AlGaInN. В том числе,

- высокоэффективных многопереходных фотоэлектрических преобразователей для наземного и космического использования на основе соединений GaAs/AlGaAs, InGaP/InGaAs/Ge;
- эффективных источников одиночных фотонов широкого спектрального диапазона (от инфракрасного (1.3 мкм) до видимой и ультрафиолетовой области спектра) различной конструкции на основе эпитаксиальных

полупроводниковых наноструктур (In,Ga,AI)As, (Zn,Cd,Mg)(S,Se,Te) и (AI,Ga,In)N;

- вертикально-излучающих лазеров на основе системы материалов AlGaInAs;
- мощных непрерывных (до 12 Вт) и импульсных (до 200 Вт) лазерных диодов на основе системы полупроводниковых материалов (AlGaIn)(AsP), излучающих в спектральном диапазоне 800-1600 нм;
- высокоэффективных иммерсионных свето и фотодиодов, работающих в диапазоне длин волн 3-5 мкм без принудительного охлаждения, на основе узкозонных полупроводниковых гетероструктур In(As,Sb,P);
- мощных импульсных диодов на основе карбида кремния;
- интегрально-оптических схем и модуляторов.



Рисунок 1. Изображение источника однофотонного излучения на основе эпитаксиальной микрорезонаторной гетероструктуры с одиночными квантовыми точками InAs, полученной с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ)

Рисунок 3. Изображение структуры вертикальноизлучающего лазера на основе многослойной структуры InGaAs/AlGaAs, полученное с помощью РЭМ



Рисунок 2. Изображение фотонной структуры с квантовыми точками CdSe/ZnSe и брэгговскими зеркалами Ta₂O₃/SiO₂ для источника однофотонного излучения, полученное с помощью РЭМ



Рисунок 4. Общий вид чипа вертикально-излучающего лазера на основе системы материалов GaAs-AlGaAs, полученный с помощью РЭМ [Малеев и др., ФТП 47, 7, 985 (2013)]

Для решения вышеперечисленных задач на базе имеющегося оборудования в Центре физики наногетероструктур ФТИ им. А. Ф. Иоффе были разработаны полные технологические циклы постростовой обработки полупроводниковых гетероструктур, включающие в себя следующие стадии:

- фотолитография для получения требуемого рисунка топологии поверхности структуры.
 Используемые установки совмещения и экспонирования позволяют обеспечить субмикронную (<0.3 мкм) точность совмещения.
- травление структуры. Разработаны процессы жидкостного, ионно-лучевого, реактивного ионного и плазмохимического травления различных структур.
- нанесение многослойных металлических (контактные слои) и диэлектрических (изолирующие, отражающие и просветляющие слои) покрытий с помощью методов вакуумного термического испарения, магнетронного, ионнолучевого нанесения и плазмо-активированного пиролиза.



Рисунок 5. Вид чипа с линейкой фотодиодов на основе гетероструктуры In(As,Sb,P), работающих при 4 мкм [Ильинская и др., ФТП 50, 5, 657 (2016)]



Рисунок 6. Установка совмещения и экспонирования АМК 2104.16



Рисунок 7. Установка ионно-лучевого травления MIM TLA20 (производство Technics Ins.)





Рисунок 8 — Установка плазмохимического травления STE ICPe681 (производство ЗАО «НТО»)

Рисунок 10 — Установка плазмохимического осаждения диэлектриков ROCAPPA.



Рисунок 9— Установка магнетронного напыления BAS 450 (производство BALZERS).



Рисунок 11 — Установка ионно-лучевого нанесения тонких пленок UMS-500 (производство BALZERS)

Для контроля стадий процесса постростовой обработки структур комплекс планарной технологии оборудован различными средствами контроля, среди которых:

- Профилометр Dektak 3030 (Франция), позволяющий определять толщину осаждаемых слоев металлов и диэлектриков с точностью до 1нм;
- Растровый электронный микроскоп Camscan S4-90FE;
- Оптические микроскопы МБИ-15, МБС-200 и MicrozoomII;
- Двухлучевой спектрофотометр U-3900 (Hitachi).

Таким образом, несмотря на то, что большая часть постростового оборудования в Центре физики

наногетероструктур появилась в 90-х гг. XX века и с тех пор были обновлены только единичные образцы имеющегося оборудования, разработанные сотрудниками группы постростовой технологии процессы планарных и 3D технологий позволяют модифицировать исходную поверхность различных полупроводниковых гетероструктур с нанометровым разрешением и создавать современные устройства оптоэлектроники и нанофотоники микронных и субмикронных размеров. За период с 2013 по 2018 г.г. сотрудниками ФТИ им. А. Ф. Иоффе получено более 20 российских и зарубежных патентов, включающих в том числе и описание разработанных процессов планарной технологии.

КРИОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Базовое подразделение — лаборатория Кинетических явлений в твердых телах при низких температурах

Криомагнитная система PPMS (Physical Property Measurement System) — комплекс для исследования физических свойств материалов в широком диапазоне температур 1.9 – 400 К и магнитных полей (до 14 Т). Производство компании Quantum Design (США). Уникальная система для точных измерений температурных и магнитных зависимостей магнитного момента, теплоемкости, теплопроводности, термоэдс и электрических транспортных параметров на постоянном и переменном токе



НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО СОЗДАНИЮ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Базовое подразделение — лаборатория Литий-ионной технологии

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2011 — 2013 гг. создан научно-технологический комплекс (НТК) «Литий-ионные аккумуляторы» предназначенный для выполнения работ по разработке современных накопителей электрической энергии. НТК укомплектован современным научным, технологическим и инженерным оборудованием. В составе НТК имеется пилотная технологическая линия, предназначенная для изготовления макетных и опытных образцов литий-ионных аккумуляторов и электрических двойнослойных конденсаторов (суперконденсаторов), включающая комплект технологического оборудования для изготовления активных масс, электродов, сборки и электрических испытаний литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов. Все технологические операции проводятся в помещениях с контролируемой влажностью и чистотой. Сборка аккумуляторов и суперконденсаторов проводится в сухой комнате с содержанием влаги не более 1%. Лабораторная база НТК обладает необходимым комплектом приборов и оборудования для проведения электрохимических и физико-химических исследований активных материалов и электролитов. Наличие НТК позволяет проводить полный цикл НИОКР по разработке литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов, осуществлять трансфер разработанных технологий в серийное производство.

Перечень решаемых НТК задач включает:

- Исследования электродных материалов и электролитов;
- Разработку литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов;
- Разработку электродных технологий;
- Разработку многоуровневых систем электронного контроля батарей;
- Разработку высоковольтных аккумуляторных батарей;
- Изготовление и испытания макетных и опытных образцов изделий.





Научная инфраструктура



Пилотное технологическое оборудование НТК

Научная инфраструктура

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

В ФТИ им. А.Ф.Иоффе сформировалась сильная школа оптической спектроскопии, что было связано с необходимостью постановки тонких методик изучения механизмов взаимодействия излучения с веществом, распространения и релаксации возбуждённых состояний в твёрдых телах, исследований полупроводниковых материалов и структур. Спектроскопические методики обеспечивали как фундаментальные исследования, так и сопровождали технологические разработки при создании полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Развитие в Институте оптических и спектроскопических методик и оборудования для их реализации позволило достичь уникальных исследовательских возможностей, позволяющих изучать в широком спектральном диапазоне сверхбыстрые процессы в исследуемых объектах с высоким пространственным разрешением и возможностью воздействия сильным магнитным полем. в том числе при сверхнизких температурах. Увеличилось разнообразие изучаемых объектов, в число которых входят полупроводниковые наногетероструктуры, метаматериалы, полимерные композиты, объекты биологического происхождения, такие как клетки и фрагменты тканей. Высококвалифицированные научные группы из разных лабораторий Института, специализирующиеся на оптико-спектроскопических исследованиях, образуют распределённый научно-технический комплекс «Лазерные и оптические исследовательские технологии». Возможности исследовательского оборудования. доступные методики и основные результаты, полученные в последнее время в таких группах, представлены в настоящем разделе.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Базовое структурное подразделение — лаборатория спектроскопии твердого тела в сотрудничестве с лабораториями квантоворазмерных гетероструктур, физики полупроводниковых гетероструктур, оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах, физики ферроиков, оптики структур с экстремальной двумерностью, микроволновой спектроскопии кристаллов, оптики поверхности, физики полупроводниковых приборов, физики аморфных полупроводников, физики кластерных структур, физики анизотропных материалов.

Оптическая спектроскопия широко используется для выявления фундаментальных физических явлений и процессов, определяющих оптические и электрофизические свойства полупроводниковых структур, для установления зависимости этих свойств от локальных характеристик структуры, а также является основой для создания неразрушающих методов количественной диагностики.

В 2008–2009 годах в ФТИ был создан многофункциональный оптический комплекс, предназначенный для исследования широкого круга объектов методами микро-фотолюминесцентной и микро-рамановской спектроскопии. Комплекс основан на тройном спектрометре T64000 (производство Франции), оснащенном конфокальным микроскопом, кремниевым и InGaAs многоканальными детекторами и большим набором дифракционных решеток: 2400, 1800, 600 и 250 штр/ мм. Это дает возможность выполнять измерения в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах (200 нм ÷ 1.7 мкм) с пространственным разрешением 1÷2 микрона. Адаптированная к спектрометру гелиевая криостатная система замкнутого цикла RC102-CFM, с полностью подавленной вибрацией, позволяет выполнять исследования объектов, имеющих микронные размеры в диапазоне температур 10÷300К. Для расширения возможностей комплекса были сконструированы и изготовлены оптические модули, дающие возможность проведения измерений в диапазоне температур 300÷1200К. При этом исследуемые образцы могут находиться в вакууме, различных газообразных средах, а также в парах жидкостей. Комплекс оснашен большим набором твердотельных и газовых лазеров. генерирующих в широком спектральном диапазоне на частотах: 325, 405, 442, 457, 476, 488, 497, 514, 633, 647, 785, 914 и 1064 нм. Предметами исследований могут быть полупроводниковые, диэлектрические, полимерные, биологические и другие твердотельные и жидкие объекты.



Рис. 1. Многофункциональный оптический комплекс.

Возможности оптического комплекса активно используются различными подразделениями ФТИ для диагностики выращенных структур и изучения фундаментальных процессов, определяющих их оптические



Рис. 2. Зависимости оптических фононных частот твердых растворов AIGaN от состава (а). Сложенные акустические фононные моды сверхрешетки GaN/AI_{0.28}Ga_{0.72} с периодом d=128 Å, полученные в различных геометриях рассеяния (b).

свойства. Исследования выполняются также в сотрудничестве со многими научными центрами России и зарубежных стран. К ним относятся: Санкт-Петер-бургский Государственный Университет, Институт физики микроструктур (Н. Новгород), Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова (Ново-сибирск), Институт физики им. Л.В. Киренского (Кра-сноярск), Nagoya University (Япония, нобелевский лауреат проф. Н. Amano), University of Fukui (Япония, проф. А. Yamamoto), CN.S. Université de Montpellier (Франция, проф. B. Gil), National Tsing-Hua University (Тайвань, проф. S. Gwo), Cornell University (США, проф. W. Shaff), Lawrence Berkeley National Laboratory (США, проф. E.E. Haller), Technische Universität Ilmenau (Германия, проф. J. Pezoldt).

Возможность проводить микро-ФЛ и микро-рамановские исследования в широком спектральном диапазоне обусловила чрезвычайно большой круг исследуемых объектов.

I. Нитриды металлов III группы (А₃N)

- а) Структуры на основе AIN, GaN
- и твердых растворов AlGaN

В настоящее время соединения А, N являются основой для создания эффективных светодиодов, лазеров и фотодиодов, работающих в видимой и ультрафиолетовой области спектра, а также мощных СВЧ транзисторов. В сотрудничестве с ростовыми группами ФТИ были исследованы структурные и оптические характеристики эпитаксиальных слоев AlGaN вырашенных во всем диапазоне составов с буферными слоями AIN на сапфировых подложках. Были изучены процессы n – и р-легирования AlGaN и исследованы AlN/AlGaN/GaN светодиодные гетеро-структуры. Были выполнены исследования структур на основе "регулярных" твердых растворов AlGaN, выращенных субмонослойной эпитаксией. Такие структуры рассматриваются в качестве новых и очень перспективных объектов для формирования активных областей УФ светодиодов, работающих при длинах волн короче 300 нм [1]. С использованием сравнительного анализа рамановского спектра рассчитанного из первых принципов и спектра, измеренного экспериментально, была установлена микроскопическая природа всех фононных мод в короткопериодных сверхрешетках (CP) (AIN) /(GaN) с числом монослоев n = 2, 4, 6 и 8. Был развит количественный метод оценки толщины индивидуальных слоев (с точностью до монослоя) в таких короткопериодных СР, основанный на данных рамановской спектроскопии [2].

б) Структуры на основе InN и твердых растворов InGaN

С использованием образцов твердых растворов InGaN, выращенных ростовыми группами ФТИ, а также предоставленными технологичными группами зарубежных научных центров из Японии, Тайваня и США, были выполнены фотолюминесцентные и рамановские исследования таких соединений в широком диапазоне концентрацией In (0<I_n<1). Было установлено, что функция Eg(x)=3.49-2.84x-bx(1-x) с параметром прогиба b=(2.5±0.1) эВ хорошо описывает зависимость ширины запрещенной зоны твердых растворов InGaN от состава во всем диапазоне молярной доли InN (0<x<1).



Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны InGaN от состава (а). Теоретические фононные дисперсионные кривые InN и экспериментальные данные (символы), полученные методом резонансного рассеяния света (b).

Выполнены систематические исследования резонансного рассеяния света на полярных оптических и акустических фононах в области фундаментального поглощения гексагонального InN. Показано, что изучение зависимости спектра рассеяния от частоты возбуждающего света позволяет восстановить дисперсию полярных оптических и акустических ветвей в широкой области волновых векторов зоны Бриллюэна. Разработан оптический метод, с помощью которого получена новая информация о фундаментальных характеристиках колебательного спектра практически важного и перспективного для использования в электронных и оптоэлектронных приборах полупроводникового соединения InN [3].





Одно из направлений дальнейшего прогресса в использовании А₃N материалов заключается в продвижении их рабочего диапазона в ИК область спектра. Возможность такого продвижения связывается с InN, ширина запрещенной зоны которого составляет ~0.7 эВ. В сотрудничестве с Институтом физики микроструктур ведутся работы, направленные на существенное улучшение кристаллического качества выращиваемых в ИФМ эпитаксиальных слоев InN и гетероструктур на их основе. Целью совместных исследований является создание фоточувствительных приемников ближнего ИК диапазона и источников излучения ближнего ИК и терагерцового диапазонов [4].

В рамках совместного проекта РФФИ-Япония выполнены оптические исследования упорядоченных массивов 3D-наноструктур на основе системы материалов (In,Ga)N с различным дизайном и параметрами, которые необходимы для развития новых типов высокоэффективных нанофотонных и оптоэлектронных приборов видимого диапазона [5]. Планируются исследования широкого набора 3D-наноструктур: от однородных наноколонок до структур типа «ядро-оболочка», а также наноколонок с низкоразмерными вставками различного типа на основе соединений InGaN, полученных методом субмонослойной дискретной эпитаксии.



Магнитные соединения

Рис. 5. Поляризованный рамановский спектр PbFeBO,, измеренный при T=11 К в геометрии с(bb)с и результат его анализа.

Методом рамановской спектроскопии выполнен комплекс исследований магнитной и решеточной динамики монокристаллов антиферромагнетиков PbFeBO, и NiWO₄. Зарегистрированы температурные и поляризационные зависимости одномагнонных и двухмагнонных возбуждений в магитоупорядоченной и парамагнитной фазах. Обнаружено интенсивное взаимодействие фононов и магнонов, проявляющееся в характерном ассиметричном уширении линий в рамановском спектре, что свидетельствует о взаимодействии решеточной и магнитной подистем. Анализ этих результатов позволит сформировать полную картину спиновой динамики, впервые построить модели дисперсии спиновых волн и плотности магнонных состояний, количественно установить величины и знаки констант обменного взаимодействия, типы одноионной анизотропии, определить характер взаимодействия магнитных и решеточных подсистем в исследуемых системах [6].



Рис. 6. Массив рамановских спектров, полученных на площади 12×12 мкм образца графена, выращенного на Si-грани 4H-SiC (а). Распределение поверхностного потенциала, измеренное на той же площади образца (b). Многофункциональный оптический комплекс был адаптирован к задачам исследования графена, выращиваемого в ФТИ методом сублимации поверхности подложки карбида кремния (SiC). Наряду с локальной диагностикой (в пятне ~1 мкм), исследовались также большие площади образцов размерами до 60×60 мкм с последующим построением карт параметров спектральных линий. Такая методика позволила реализовать одну из основных задач работы, которая заключалась в оценке степени однородности структурных характеристик по площади образцов. С использованием возможностей оптического комплекса, явившихся



Рис. 7. Микро-рамановские спектры слоев MoS₂ различной толщины (а). Температурная зависимость спектра микро-ФЛ монослоя MoS₂ на SiO₂/Si при возбуждении 2.33 эВ (b).

основой для комплексной диагностики, были оптимизированы ростовые параметры и создана не имеющая аналогов в России технология роста эпитаксиального монослойного графена большой площади методом сублимации в аргоне Si-грани SiC. Структурные, электронные и транспортные свойства графена сравнимы с параметрами лучших мировых образцов, изготовленных сублимацией, что открывает возможность его использования в электронных приборах нового поколения [7].

IV. 2D дихалькогениды переходных металлов

Исследования 2D объектов не ограничиваются только структурами на основе графена. Ведутся также оптические исследования соединений на основе дихалькогенидов переходных металлов: MoS₂, WS₂, MoSe₃, WSe₂ и других перспективных двумерных полупроводников. Известно, что электронные свойства этих соединений радикальным образом зависят от толщины исследуемых слоев. Универсальный оптический комплекс обладает уникальными возможностями для исследования таких объектов. Использование спектрометра в режиме тройного монохроматора позволяет регистрировать низкочастотные рамановские спектры, которые эффективно используются для оценки толщины слоев, а регистрируемые из той же точки образца спектры микро-фотолюминесценции дают информацию об их электронных характеристиках. При этом такие комбинированные исследования возможно проводить в интервале температур 10÷1200К.

Со времени создания комплекса, получены также важные результаты в совместных исследованиях с многочисленными лабораториями ФТИ, работающими по следующим тематикам: NV-центры в алмазе, структуры на основе кремния и твердых растворов кремний-германий, фотонные кристаллы, ультрадисперсный алмаз, карбид кремния, фосфид и арсенид индия, III-As наноструктуры, полупроводниковые и сегнетоэлектрические нанопроволоки в пористых матрицах и другие соединения.

Публикации

 V.N. Jmerik, T.V. Shubina, A. M. Mizerov, K. G. Belyaev, A. V. Sakharov, M. V. Zamoryanskaya, A. A. Sitnikova, V.Yu, Davydov, P. S. Kop'ev, E. V. Lutsenko, N. V. Rzheutskii, A. V. Danilchik, G. P. Yablonskii, S. V. Ivanov. AlGaN quantum well structures for deep-UV LEDs grown by plasma-assisted MBE using sub-monolayer digital-alloying technique. // J. Cryst. Growth. 2009, Vol. 311, P. 2080–2083.

- V.Yu. Davydov, E. M. Roginskii, A. N. Smirnov, Yu.E. Kitaev, M.A. Yagovkina, R. N. Kyutt, M. M. Rozhavskaya, E. E. Zavarin, W. V. Lundin, M. B. Smirnov. Lattice dynamics of shortperiod AlN/GaN superlattices: Theory and experiment. // Phys. Status Solidi A. 2013. Vol. 210, P. 484–487.
- V.Yu.Davydov, A.A. Klochikhin, A. N. Smirnov, I.Yu. Strashkova, A.S, Krylov, H. Lu, W. J. Schaff, H.-M. Lee, Y.-L. Hong, S. Gwo. Selective excitation of E1(LO) and A1(LO) phonons with large wave vectors in Raman spectra of hexagonal InN. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, Art. 081204(R).
- B.A. Andreev, K.E Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, D.N. Lobanov, P.A. Bushuykin, L. V. Krasilnikova, E. V. Skorokhodov, P.A. Yunin, A. V. Novikov, V.Yu. Davydov, Z. F. Krasilnik. Towards the indium nitride laser: Obtaining infrared stimulated emission from planar monocrystalline InN structures. // Sci. Rep. 2018. Vol. 8, Art. 9454.
- Y. Robin, S. Y. Bae, T. V. Shubina, M. Pristovsek, E.A. Evropeitsev, D.A. Kirilenko, V.Y. Davydov A.N. Smirnov, A.A. Toropov, V.N. Jmerik, M. Kushimoto, S. Nitta, S. V. Ivanov, H. Amano. Insight into the performance of multi-color InGaN/GaN nanorod light emitting diodes. // Sci. Rep. 2018. Vol. 8, Art. 7311.
- M.A. Prosnikov, V. Y. Davydov, A. N. Smirnov, M. P. Volkov, R. V. Pisarev, P. Becker, L. Bohaty. Lattice and spin dynamics in a low-symmetry antiferromagnetic NiWO4. // Phys. Rev. B. 2017. Vol. 96, Art. 014428.
- В. Ю. Давыдов, Д. Ю. Усачёв, С. П. Лебедев, А. Н. Смирнов,
 В. С. Левицкий, И. А. Елисеев, П. А. Алексеев, М. С. Дунаевский,
 О. Ю. Вилков, А. Г. Рыбкин, А. А. Лебедев. Исследование кристаллической и электронной структуры графеновых плёнок, выращенных на 6H-SiC (0001). // ФТП. 2017. Т. 51, С. 1116–1124.

ОПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ КВАНТОВОЙ ФОТОНИКИ

Базовое структурное подразделение — лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур.

Разработанный измерительный комплекс является уникальным как для ФТИ им. А.Ф. Иоффе, так и для России в целом.

Квантовая фотоника — сравнительно новая отрасль науки, в последние два десятилетия стремительно набирающая силу в связи с появлением принципиально новых перспективных направлений в области информационных технологий – квантовых вычислений и квантовой криптографии. Важнейшим фактором, определяющим развитие этих направлений, является разра-ботка основных элементов квантовой фотоники — триггерных источников квантового света, позволяющих генерировать «по требованию» интенсивные потоки одиночных фотонных состояний, в том числе, характеризующихся высокой степенью неразличимости. Основным методом исследования свойств таких устройств является корреляционная оптическая спектроскопия, позволяющая определять статистику фотонных корреляций в сгенерированном излучении. В настоящее время комплексы корреляционной оптической спектроскопии создаются и функционируют в ведущих мировых научных центрах, занимающихся разработкой и использованием источников квантового света. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе реализованы и продолжают развиваться корреляционные оптические методики, позволяющие определять основные характеристики квантового света в широкой области спектра от УФ до среднего ИК диапазона.

Развитие в Институте методов корреляционной оптической спектроскопии проводилось с 2014 г. в лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур в рамках проектов Российского Научного Фонда и Фонда Перспективных Исследований, выполняемых под руководством С.В. Ива-нова. Постановка измерительных оптических методик осуществлялась параллельно с разработкой и изготовлением опытных образцов генераторов однофотонного излучения, функционирующих на основе фотонных структур с одиночными полупроводниковыми квантовыми точками (КТ). В задачи входило создание триггерных однофотонных источников, предназначенных для различ-ных применений в области квантовых информационных технологий: генераторов однофотонных состояний для систем квантовой криптографии, работающих как в составе атмосферных и космических оптических линий связи (видимый и ближний ИК спектральные диапазоны), так и на телекоммуникационной длине волны (1.3 мкм), а также генератора неразличимых фотонов для ра-боты

в составе оптических линейных систем квантовых вычислений (ближний ИК диапазон).

В соответствие с этим, были развиты оптические измерительные методики, удовлетворяющие следующим требованиям:

- осуществление эффективного сбора излучения субмикронной фотонной структуры с одиночной полупроводниковой КТ в условиях охлаждения до криогенных гелиевых температур;
- измерение автокорреляционной функции второго порядка для линии излучения одиночного экситона, локализованного в КТ;
- измерение степени неразличимости последовательно излученных фотонных состояний, опре-деляющей степень идентичности волновых пакетов одиночных фотонов;
- функционирование в широком спектральном диапазоне 400 нм — 1.3 мкм.

Разработанный оптический комплекс собран на прецизионном оптическом столе с пневматической подвеской и активным подавлением вибраций (Newport), обеспечивающем долговременную пространственную стабильность исследуемой структуры на нанометровом уровне. Охлаждение фотонной структуры с квантовой точкой до криогенных температур реализуется при помещении образца в гелиевый микрокриостат (ST500-Attocube, Janis) с инсталлированной трех-координатной низкотемпературной пьезоподвижкой, позволяющей контролировано перемещать образец с точностью до 20 нм (см. рисунок 1). Пространственное выделение и сбор излучения одиночного экситона производится с помощью конфокального оптического микроскопа, собранного на базе планахроматического объектива Mitutoyo (50х, числовая апертура 0.42 или 100х, числовая апертура 0.55). Спектр излучения регистрируется с помощью решеточного спектрометра с формированием изображения (SpectraPro-500, Princeton Instruments), укомплектованного охла-ждаемой ПЗС-камерой (Pylon 100BR eXcelon или Pylon IR, Princeton Instruments).

Измерение автокорреляционной функции второго порядка g(2)(т) выполняется с помощью схемы мощностного интерферометра Хэнбери Брауна–Твисса (см. рис.нок 2 (а)), собранного на основе оптического светоделителя, электронной схемы высокоскоростного счетчика совпадений (SPC-130, Becker & Hickl) и двух однофотонных детекторов. В зависимости от длины волны регистрируемого излучения используются два типа детекторов: однофотонные кремниевые лавин-



Рисунок 1 — Гелиевый оптический микрокриостат Janis ST500 с инсталлированными низкотемпе-ратурными наноподвижками AttoCube XYZ в составе установки микро-фотолюминесценции.

ные фотодиоды PMD-100 производства Micro Photon Devices (400-900 нм, временное разрешение ~40 пс) или однофотонные приемники на основе сверпроводниковых нанопроволок производства Scontel (900-1500 нм, временное разрешение ~35 пс). В последнем случае сверхпроводниковые приемники располагаются в отдельном гелиевом криостате, а оптический сигнал к ним доставля-ется с помощью одномодовых оптических волокон (см. рис. 3). Для идеального ОИ величина ав-токорреляционной функции при нулевой



Рисунок 2 — а) Схема Хэнбери Брауна–Твисса для измерения автокорреляционной функции второго порядка. б) Схема Хонг-У-Мандела для измерения степени неразличимости одиночных фотонов.

задержке g(2)(0) равна нулю, что отражает нулевую ве-роятность одновременной регистрации двух и более однофотонных состояний.

Для измерения степени неразличимости одиночных фотонов используется схема интерферометра Хонг-У-Мандела (см. рисунок 2 (б)), собранного с использованием тех же оптомеханических, оптоэлектронных и электронных компонент, а также прецизионной оптической линии задержки (DL325, Newport). На вход схемы подается периодическая последовательность пар исследуемых однофотонных импульсов излучения. При определенном положении линии задержки импульсы совмещаются на светоделителе как в пространстве, так и во времени. В случае полной неразличимости фотонных состояний квантовая интерференция бозонных частиц приводит к то-му, что



Рисунок 3 — а) Мощностной интерферометр Хэнбери Брауна — Твисса с системами ввода излуче-ния в одномодовое оптоволокно. б) Сверхпроводниковые однофотонные детекторы Scontel в гелиевом криостате с оптоволоконными входами. обе частицы выходят из светоделителя в одну сторону и соответствующий пик на гисто-грамме совпадений полностью пропадает. В качестве источника импульсного возбуждения

ФЛ одиночных квантовых точек в экспериментах используется модуль на основе пикосекундного лазерного диода Pilas производства Advanced Laser Diode Systems (405 нм, 40 пс, до 120 MHz) или перестраиваемый фемтосекундный титан-сапфировый лазер MIRA 900 с генератором 2-й, 3-й и 4-й гармоник производства

Coherent.

На рисунке 4(а) в качестве иллюстрации приведены спектры излучения одиночной КТ InAs/AlGaAs, помещенной в структуре конусного фотонного волновода, измеренные с помощью разработанного оптического комплекса при разных температурах. В спектре доминирует узкая линия излучения одиночных экситонов, которая с ростом температуры сдвигается в сторону больших длин волн, уширяется и, в конце концов, гаснет. На рисунке 4 (б) показана автокорреляционная функция g(2)(т), измеренная в зависимости от времени задержки при импульсном возбуждении при





тех же температурах. При минимальной температуре 8 К интенсивность пика, соответствующего нулевой задержке, составляет не более 7% от интенсивности остальных пиков, что свидетельствует о генерации практически «чистого» однофотонного излучения. С ростом температуры значение g(2)(0) увеличивается, но вплоть до 78 К составляет не более 0.3, что также является индикатором неклассического, однофотонного характера излучения, хотя и с меньшей «чистотой». Резюмируя, разработанный и собранный оптический комплекс позволяет определять ста-тистические характеристики однофотонного излучения в широком спектральном диапазоне (400-1300 нм), а также степень неразличимости последовательно излученных однофотонных состояний и, тем самым, оценивать применимость разрабатываемых источников квантового света для работы в составе систем квантовой криптографии и квантовых вычислений.

КОМПЛЕКС ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Базовое структурное подразделение — Лаборатория физики ферроиков, при участии Лаборатории оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах

В 2013-2018 гг. в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН при поддержке Программы Правительства РФ П220 «Мегагранты», Российского Научного Фонда и Российского Фонда Фундаментальных Исследований создан современный экспериментальный комплекс для проведения исследований динамических процессов в магнитных, сегнетоэлектрических и мультиферройных средах и наноструктурах с фемтосекундным временным, субмикронным пространственным разрешением (<u>http://</u> www.ioffe.ru/ferrolab/Labs&Equipment).

Одной из важнейших фундаментальных и прикладных задач в современной физике конденсированного состояния является поиск новых подходов к управлению состоянием материалов и наноструктур. Существование такой задачи обусловлено прежде всего возрастающими объемами информации, и, следовательно, потребностью к увеличению скорости ее обработки, емкости носителей, а также качественному уменьшению связанных с этим. Ряд пионерских работ, выполненных, в том числе, и при участии исследователей из ФТИ показали, что перспективным решением этой задачи может стать использование коротких, длительностью менее 1 пикосекунды, лазерных импульсов для управления намагниченностью, электрической поляризацией, напряжениями в наноструктурах.

Для полноценного активного участия ФТИ в исследованиях по данной актуальной тематике в лаборатории физики ферроиков, основанной под эгидой программы «Мегагранты», создан комплекс, позволяющий исследовать сверхбыстрые динамические процессы в различных материалах при воздействии на них фемтосекундными лазерными импульсами. Особенностями комплекса являются высокое временное разрешение до 100 фс, пространственное разрешение до 1 микрона, а также широкий спектральный диапазон лазерного излучения, включающий ближний ИК (до 2.6 микрон) и весь видимый диапазон (до 310 нм).

В комплекс входят четыре независимые лабораторные установки, построенные сотрудниками лаборатории физики ферроков на основе двух фемтосекундных лазерных источников:

Фемтосекундные лазерные источники для оптической спектроскопии с фемтосекундным временным разрешением				
Фемтосекундный регенеративный усилитель Pharos SP (Light Conversion Ltd) и оптический параметрический усилитель Orpheus (Light Conversion Ltd)	Длительность импульсов Центральная длина волны импульса Частота повторения импульсов Энергия в импульсе	130-200 фс 310-2600 нм Одиночный импульс – 200 кГц До 1 мДж		
Фемтосекундный осциллятор ТЕМА-100 (Авеста-Проект) и оптический параметрический усилитель TOPOL-1050-с (Авеста-Проект)	Длительность импульсов Центральная длина волны импульса Частота повторения импульсов Энергия в импульсе	100-150 фс 700-1100 нм 70 МГц До 10 нДж		



Фемтосекундные источники Pharos SP+Orpheus и оптомеханические линии задржки на 2 и 4 нс.

В основе измерений динамики электронов, спинов и решетки, возникающей при воздействии на материал короткого возбуждающего оптического импульса, лежит принцип «накачки-зондирования». В качестве импульса накачки служит мощный фемтосекундный оптический импульс (или генерируемый с его помощью электрический или акустический импульс). Воздействие этого импульса запускает, например, изменения намагниченности в магнитном материале (см. раздел <ссылка на раздел буклета по оптическому управлению намагнчиенностью >), причем эти изменения могут происходить на временах, которые существенно короче времен измерений, доступных в стандартной магнитометрии. Поэтому для детектирования эволюции намагниченности с субпикосекундным временным разрешением используются относительно слабые фемтосекундные лазерные импульсы — импульсы зондирования. Известно, что при отражении/прохождении слабого оптического импульса через магнитную среду его поляризация меняется в зависимости от величины и направления намагниченности среды. Таким образом, измеряя изменения поляризации импульсов зондирования в определенный момент времени после воздействия импульса накачки, можно определить состояние намагниченности среды в этот момент времени. Варьируя с высокой точностью временную задержку между импульсами накачки и зондирования, мы можем детектировать индуцированную импульсом накачки сверхбыструю динамику намагниченмности (а также динамические электронные и решеточные процессы).



Лабораторные установки для оптической спектроскопии с фемтосекундным временным разрешением

Базовая установка фемтосекундной оптической накачки-зондирования	Импульс накачки, длительность, фокусировка, спектральный диапазон Импульс зондирования, длительность, фокусировка, спектральный диапазон Измеряемые эффекты Временная развертка Пространственная развертка Диапазон температур Диапазон внешних полей	Оптический, 130-200 фс, 100 мкм, 310 — 2600 нм Оптический, 130-200 фс, 100 мкм 310 — 2600 нм Эффекты Фарадея, Керра, Фохта, оптическое пропускание и отражение Диапазон до 4 нс, шаг 6 фс Диапазон до 80 микрон, шаг 1 нм 4.2 — 300 К ±0.6 Т (постоянное поле)
Установка фемтосекундной оптической накачки- зондирования с микронным разрешением	Импульс накачки, длительность, фокусировка, спектральный диапазон Импульс зондирования, длительность, фокусировка, спектральный диапазон Измеряемые эффекты Временная развертка Диапазон температур Диапазон внешних полей	Оптический, 170 фс, 5 мкм, 2600-310 нм Оптический, 170 фс, 5 мкм, 2600-310 нм Эффекты Керра, отражение Диапазон до 2 нс, шаг 6 фс Комнатная температура ±0.5 T (постоянное поле)

Сканирующий оптический микроскоп с временным разрешением (TROPSOM)	Импульс накачки, длительность, фокусировка, спектральный диапазон Импульс зондирования, длительность, фокусировка, спектраль- ный диапазон Измеряемые эффекты Временная развертка Пространственная развертка Диапазон температур Диапазон внешних полей	Оптический, 100-150 фс, 1.5 мкм, 1050 нм/525 нм Оптический, 100-150 фс, 1 мкм, 700-1100 нм/350 — 550 нм Эффекты Керра, отражение Диапазон до 4 нс, шаг 6 фс Диапазон до 80 микрон, шаг 1 нм Комнатная температура +2 T (постоянное поле)
Установка накачки- зондирования с пикосекундными акустическими импульсами	Импульс накачки, длительность, фокусировка Импульс зондирования, длительность, фокусировка, спектральный диапазон Измеряемые эффекты Временная развертка Диапазон температур Диапазон внешних полей	Акустический, 10-100 пс, 50 мкм Оптический, 170 фс, 30 мкм, 1030/515 нм Эффекты Керра, отражение Диапазон до 2 нс, шаг 6 фс 293 — 393 К <u>±</u> 0.5 T (постоянное поле)

Созданные в лаборатории физики ферроиков экспериментальные установки благодаря сочетанию их параметров позволяют проводить исследования сверхбыстрой динамики намагниченности, электрической поляризации, решетки, электронов в различных материалах. В качестве импульсов накачки могут использоваться как непосредственно оптические импульсы, так и пикосекундные акустические импульсы.

Как следует из описания, каждая из четырех установок предназначена для решения определенного спектра задач. Так, кроме базовой установки накачки зондирования и установки с улучшенным (до 5 мкм) пространственным разрешением, в лаборатории создан сканирующий оптический микроскоп с временным разрешением, чьей особенностью является совмещение сканирования по времени со сканированием по пространству. Это позволяет изучать, в частности, генерацию и распространение спиновых волн в тонких магнитных пленках. Подобные исследования востребованы в настоящее время в связи с идеями совмещения оптических методов генерации спиновых волн и управления их дисперсионными характеристиками методами магноники.

Особенностью установки накачки-зондирования с пикосекундными акустическими импульсами является использование в качестве импульсов накачки пикосекундных импульсов деформации (пакетов акустических фононов). Использование таких импульсов для возбуждения электронной, фононной или спиновой подсистем в наноструктурах широко востребовано в связи с развитием таких современных направлений, как наномеханика, стрейтроника и пикосекундная магнитоакустика.

Во всех установках предусмотрены возможности модификации с целью адаптации к решению новых задач, исследованию новых материалов и эффектов.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ И ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР НАНОФОТОНИКИ И НАНОПЛАЗМОНИКИ

Базовое структурное подразделение — лаборатория Оптики поверхности, исследования по схожим тематикам ведутся также в лабораториях Спектроскопии твердого тела, Физико-химических свойств полупроводников, Диагностики материалов и структур твердотельной электроники

Успехи в развитии технологий последних лет обусловили создание целого класса функциональных полупроводниковых, металлических и молекулярных микро и наноструктур. Многие из них рассматриваются в качестве перспективных материалов для создания приборов электроники, оптоэлектроники и фотовольтаики нового поколения. Поэтому актуальность исследования структурных, механических, оптических и электронных свойств таких структур вполне очевидна, как и необходимость развития соответствующих методик диагностики, обладающих высоким (в пределе атомным) разрешением и чувствительностью, обеспечивающей возможность регистрации сигналов от нескольких атомов или молекул.

В лаборатории Оптики поверхности создан научный экспериментальный комплекс, обеспечивающий комбинированное применение методик сканирующей зондовой микроскопии (C3M) и оптической модуляционной спектроскопии для характеризации и исследования структурных, электрофизических и оптических свойств широкого ряда полупроводниковых и металлических наноструктур.

Работы в направлении развития новых методов сканирующей зондовой микроскопии для исследований и анализа наноструктур начались в лаборатории Оптики поверхности ФТИ им. А.Ф.Иоффе, под руководством А.Н. Титкова (1994-2014гг). В настоящий момент развитые методики СЗМ, входящие в комплекс, позволяют осуществлять исследования структурных, механических, и электронных свойств таких наноструктур. Схема СЗМ приведена на Рис. 1. Основные элементы СЗМ включают: зонд, прикрепленный к гибкому кантилеверу, пьезосканер для перемещений зонда относительно поверхности образца, оптическая система детектирования изгибов кантилевера, система обратной связи, а также блок управляющей электроники и компьютер. В зависимости от типа взаимодействия зонд-поверхность при сканировании можно с нанометровым разрешением измерять: а) топографию поверхности, б) потенциал поверхности, в) светоизлучающие характеристики поверхности и многие другие важные свойства. Методы СЗМ обладают нанометровым разрешением, что обусловлено нанометровой остротой зонда.

Для оптических исследований полупроводниковых и металлических наноструктур используется высокочувствительная оптическая модуляционная методика — спектроскопия анизотропного отражения, которая работает следующим образом (см. Рис. 2). Свет, выходящий из монохроматора (а), после линейного поляризатора (b) попадает на фотоупругий модулятор (c), который осуществляет модуляцию линейной поляризации света относительно ортогональных направлений, совпадающих с направлениями осей α и β исследуемой поверхности. Отраженный от поверхности образца (d) свет регистрируется фотоумножителем (e)





с дальнейшей обработкой сигнала синхронным детектором. В результате регистрируется сигнал анизотропии $\Delta R/R$ (см. формулу на Рис. 2), где R_{α} и R_{β} — коэффициенты отражения света поляризованного вдоль осей α и β . Чувствительность методики находится на уровне 10⁻⁵, что обеспечивает уверенную регистрацию спектров от атомных слоев поверхности, субмонослойных покрытий, наноразмерных структур и т.д.

В настоящее время развитые СЗМ методики, в



Рисунок 2. Схема измерения спектров анизотропного отражения

сочетании с методикой спектроскопии анизотропного отражения успешно применяются для исследования структуры, а также механических, оптических и электрофизических свойств полупроводниковых, металлических и молекулярных микро и наноструктур.

Ниже приведены примеры, иллюстрирующие возможности использования исследовательского комплекса. На рисунке 3 приведено СЗМ изображение квантовой точки InP высотой 10 нм с отчетливо выявленной кристаллической огранкой. С помощью токовых СЗМ методик был обнаружен и исследован эффект удержания электрических зарядов, инжектированных в полупроводниковые квантовые точки и металлические (Pt, Ni, Cu) наночастицы. Данный эффект может быть использован при построении устройств энергонезависимой памяти.

Выполнены C3M исследования полупроводниковых А^{III}B^V (GaAs, InGaAs, InP, GaP и др.) нитевидных нанокристаллов (HHK). Для таких наноструктур впервые удалось измерить значения модуля Юнга, которые существенно отличается от соответствующих значений для объемных материалов А^{III}B^V [1]. Установлена взаимосвязь аномальной величины модуля Юнга в HHK с чередованием кристаллических фаз "вюрцит-цинковая обманка".

С использованием токовых СЗМ методик выполнены исследования процессов протекания тока через одиночные ННК и влияния поверхностных состояний на электрофизические и оптические свойства ННК. На основе результатов этих исследований развит метод химической пассивации поверхности GaAs ННК атома-





Рисунок 3. СЗМ изображение InP квантовой точки (а) и соответствующее сечение (b)

ми азота, обеспечивающий существенное уменьшение плотности поверхностных состояний [2].

В лаборатории разработан безапертурный, метод, обеспечивающий регистрацию световых потоков с субволновым разрешением, в котором СЗМ-зонд впервые используется в качестве оптического детектора. Метод основан на измерении светоиндуцированного сдвига частоты колебаний СЗМ-зонда. С помощью разработанного метода выполнены оптические ближнеполевые измерения на сколах инфракрасных полудисковых лазеров с модой шепчущей галереи (МШГ). Установлено, что вблизи краёв полудиска возникает сложная серия пятен светоизлучения мод шепчущей галереи, симметричная относительно центра рассеченного МШГ-лазера (Рис. 4). Обнаружено, что в отличие от случая целого МШГ-диска, области максимальной интенсивности пространственных мод "отодвинуты" от краев полудиска на значительное расстояние (Рис. 4 (b)). Данный эффект обусловлен эффектом хаотизации мод высокого порядка при скалывании дискового МШГ-лазера с отклонением от центра. Кроме того, удалось наблюдать семейство субволновых областей, интенсивность которых экспоненциально спадает с z-расстоянием, что указывает на их эванесцентную природу. Таким образом, разработанный метод позволяет исследовать пространственную структуру мод, выходящих из резонатора в виде бегущих волн, а также «замкнутых» мод, испытывающих полное внутреннее отражение внутри лазерного резонатора [3].



Рисунок 4. (а) — схема рассеченного дискового МШГ-лазера; (b) — карты светоизлучения, измеренные вблизи краёв рассеченного МШГ-лазера на поверхности скола; (c) — распределение на сколе МШГ-

лазера зон эванесцентных волн и зон, излучающих бегущие волны.

В лаборатории начаты работы по созданию и

исследованию структур металл-полупроводник с наночастицами металла субволновых размеров. В таких



Рисунок 5, сверху — нанокластеры In на поверхности InAs(100); внизу — спектры анизотропного отражения ансамбля нанокластеров In (красная кривая) и исходной подложки (синяя кривая).

наночастицах светом можно возбудить резонансные колебания электронной плазмы, называемые локализованными плазмонами. Исследование локализованных плазмонов важно с фундаментальной точки зрения, а также в связи с перспективой их использования в приборах нанофотоники, фотовольтаики, медицины и т.д.

В ходе этих работ развита электрохимическая

технология, позволяющая формировать нанокластеры индия на поверхности полупроводникового кристалла InAs. Уникальность метода состоит в том, что нанокластеры формируются из атомов индия самого кристалла InAs [4]. Характеризация формы и размеров нанокластеров осуществлялась с помощью атомно-силового микроскопа. Установлено, что размер нанокластеров In, сформированных на поверхности InAs(100) в зависимости от длительности электрохимической обработки составляет ~30-60nm (см. Рис 5, верх).

Применение спектроскопии анизотропного отражения [5] позволило впервые обнаружить и исследовать плазмонную анизотропию полученных массивов нанокластеров индия [4]. Амплитуда сигнала ΔR/R для плазмонной анизотропии оказывается на 1-2 порядка больше, чем у сигнала от исходной поверхности InAs(100) Рис. 5. Показано, что плазмонная анизотропия обусловлена различием в нанокластерах частот плазмонов, поляризованных вдоль осей [110] и [110] кристалла InAs. Это, в свою очередь, вызвано различием длин полуосей нанокластеров In вдоль этих направлений.

Публикации

- M. S. Dunaevskiy, P. G. \$3eydt, E. L. \$3ahderanta, P.A. Alekseev, T. H. \$3aggren, J. P. Kakko, H. J. \$3iang,
 - H.L. \$3ipsanen, Nano Letters, 17, 3441-3446 (2017)
- P.A. Alekseev, M.S. Dunaevskii, V.P. Ulin, T.V. Lvova, D.O. Filatov, A. V. Nezhdanov, A. I. Mashin, V. L. Berkovits, Nano Letters, 15, pp. 63-68 (2015)
- P.A. Alekseev, M.S. Dunaevskiy, A. M. Monakhov, V. V. Dudelev, G. S. Sokolovskii, R.A. \$3rinero, R. T. \$3eissier, A. N. Baranov, Opt. Express, **26**, 14433 (2018)
- V. L. Berkovits, V.A. Kosobukin, V.P. Ulin, A. B. Gordeeva, V.N. Petrov, Surf. Sci., **632**, L9 (2015)
- V. L. Berkovits, V.A. Kosobukin, A. B. Gordeeva, J. Appl. Phys., **118**, 245305, (2015)

Развитие инфраструктурной базы научных исследований на основе реализации проекта «Строительство и техническое перевооружение НИОКР-центра ФТИ Им. А.Ф. Иоффе»

Проект направлен на глубокую модернизацию инфраструктурной базы НИОКР в Институте: создание на площади 33 тыс. кв. м. комплекса специализированных технологических зон, оснащённых современным оборудованием, аналогичным промышленному, для ускоренного масштабирования разрабатываемых технологий.

Запроектированное сложное технологическое оборудование требует для своего функционирования создания специализированной инженерной инфраструктуры: чистых производственных помещений (ЧПП) с поддержанием определённых параметров микроклимата, системы обеспечения деионизованной водой класса А, системы очистки технологических выбросов (жидких и газообразных), системы технологических специальных и электронных газов высокой степени очистки. Проектом предусматривается создание собственной системы получения газообразного сверхчистого водорода, системы хранения жидкого азота и его газификации, системы холодоснабжения большой мощности, глубокая реконструкция энергетического хозяйства Института, сетей водоснабжения и водоотведения.

Создаваемая современная инфраструктурная база позволит проводить фундаментальные и прикладные исследования по целому ряду направлений. Особенностью проекта является создание единой инфраструктуры для направлений с близким технологическим циклом, что позволяет многократно удешевить



Научная инфраструктура

проект по сравнению с созданием независимых технологических центров под каждое направление. Ядром инфраструктуры станет единый комплекс ЧПП высокого класса (ИСО5-ИСО8) общей площадью 3800 квадратных метров, в котором будет располагаться самое современное технологическое оборудование для создания широкой номенклатуры опто – и микро электронных гетероструктур и чипов.

Основные технологические зоны и участки создаваемого НИОКР-центра

Зона ростовых технологий:

- Участок мос-гидридной эпитаксии (установки мосгидридной эпитаксии);
- Участки молекулярно-пучковой эпитаксии (установки молекулярно-пучковой эпитаксии);
- Участок имплантации (установка ионной имплантации).

Зона технологий сборки:

- Участки сборки (комплект установок для монтажа и разварки чипов);
- Участок корпусирования (установки корпусирования);
- Участки сборочной химии и электрохимии;
- Участки шлифовки, полировки и резки, скрайбирования;
- Участок технологической метрики (комплект диагностического оборудования ростовых и сборочных технологий).

Зона постростовых технологий:

- Участок напыления (установки прецизионной металлизации для разных металлов, установки вжигания контактов);
- Участок плазмохимии (установки плазменной очистки, травления и осаждения диэлектрических покрытий, установки магнетронного напыления);

- Участки контактной и электронной литографии (установки нанесения и сушки фоторезиста, установки проявления, промывки и сушки фоторезиста, установки сушки и задубливания фоторезиста, установки двухстороннего совмещения и экспонирования; электронный литограф, установки «взрывной литографии», установки жидкостного травления);
- Участки жидкой химической обработки (органика и неорганика);
- Участок электрохимии (установки гальванического нанесения покрытий);
- Участок технологической метрики (комплект диагностического оборудования).

Зона негетероструктурных технологий:

- Участок термоэлектрических материалов;
- Участок сегнетоэлектриков;
- Участок высокоэффективных катализаторов на основе наночастиц;
- Участок органических печатных технологий.

Запуск и развитие НИОКР-центра ФТИ им. А.Ф. Иоффе позволит доводить до стадии промышленного производства результаты прорывных разработок в областях новых функциональных наноматериалов, оптоэлектроники и электроники, энергоэффективности и энергосбережения, приборостроения в интересах высокотехнологичных отраслей, оборонно-промышленного комплекса и для обеспечения импортозамещения.

Заявлена реализация и развитие 18 направлений, объединенных в 4 группы:

Наноматериалы и устройства на их основе	6 направлений)
Оптоэлектроника и электроника	5 направлений
Энергоэффективность и энергосбережение	4 направления
Разработка новых приборов и оборудования	3 направления

Суммарный объем НИОКР по 18 направлениям, составит около 1 млрд. руб. в год. Общий объем производства после освоения результатов НИОКР по заявленным направлениям промышленными предприятиями составит порядка 20 млрд. рублей в год.



НАУЧНОЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Важным направлением деятельности Института является научное и функциональное приборостроение. Глубокое понимание специалистами ФТИ физических явлений позволяет разрабатывать тонкие методики исследований, а для их реализации проектировать и изготавливать измерительные приборы, исследовательские и технологические установки, многие из которых обладают уникальными характеристиками.

Разрабатываемые приборы можно укрупнённо классифицировать по их назначению следующим образом:

- технологическое оборудование для эпитаксиального выращивания полупроводниковых слоёв;
- технологическое оборудование для выращивания объёмных кристаллов;
- масс-спектрометрические приборы;
- ЭПР-спектрометры;
- оптико-спектральные приборы для характеризации материалов и полупроводниковых структур;
- полупроводниковые, в том числе оптоэлектронные, детекторы и сенсоры;
- интегрально-оптические модуляторы;
- магнитометры.

Разработки Института в области научного и функционального приборостроения находят широкое применение. Ряд создаваемых в Институте измерительных комплексов, например, для характеризации солнечных элементов и батарей, поставляется во многие профильные научные и промышленные организации, в том числе зарубежным партнёрам. Масс-спектрометрические приборы медицинского назначения проходят клиническую апробацию. Тензодатчики используются при разработке перспективных робототехнических систем. Полупроводниковые детекторы изготавливаются для таких важных объектов, как Большой адронный коллайдер. Институт является разработчиком и изготовителем нескольких диагностических систем для международного термоядерного реактора ИТЭР.
ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ГФЭ МОС ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ III-N СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ СВЧ ПРИМЕНЕНИЙ

Базовое структурное подразделение — лаборатория Физики полупроводниковых гетероструктур

Основной промышленной технологией эпитаксиального роста гетероструктур на основе III-N соединений для микроэлектроники и фотоники является газофазная эпитаксия из металлорганических соединений (ГФЭ МОС). В лаборатории Физики полупроводниковых гетероструктур ФТИ им. А. Ф. Иоффе была создана оригинальная установка Dragon-125 и разработана технологии ГФЭ МОС для опытного производства гетероструктур на основе III-N соединений, позволяющая создавать различные типы структур для транзисторов и светоизлучающих приборов.

Сотрудниками лаборатории Физики полупроводниковых гетероструктур впервые в России в 1995 г. были начаты работы по разработке технологии эпитаксиального роста гетероструктур на основе III-N соединений методом ГФЭ МОС. В 2003 г. были успешно проведены пусконаладочные работы первой в России промышленно-ориентированной установки ГФЭ МОС Aixtron 2000НТ (Германия). В результате многолетней работы в области III-N технологии сотрудниками НТЦ микроэлектроники РАН и ФТИ им. А.Ф. Иоффе был создан оригинальный экспериментальный образец установки ГФЭ МОС Dragon-125 нового поколения (рис. 1) и разработаны технологии для выращивания в ней



Рисунок 1. Установка МОС-гидридной эпитаксии Dragon 125 для опытного производства III-N гетероструктур.

эпитаксиальных структур для различных электронных и оптоэлектронных приборов. Полученные результаты могут послужить не только основой для разработки промышленной отечественной установки ГФЭ МОС, но и базой для развития принципиально нового направления в дизайне МОС-гидридных реакторов: компактных одноподложечных с малой продолжительностью эпитаксиального цикла.

Установка Dragon-125 имеет следующие характерные особенности: горизонтальный реактор, металлический корпус реактора и индукционный нагрев. Диаметр зоны осаждения составляет 125 мм, что позволяет выращивать гетероструктуры размером 2", 3" и 100 мм. Давление в реакторе изменяется в диапазоне 100 — 1600 мбар, то есть существует возможность работать при давлении выше атмосферного, что невозможно в большинстве коммерчески доступных установок. Установка оснащена специально разработанной системой контроля эпитаксиального процесса, включающей 3 *in-situ* датчика отражения (для контроля скорости роста и кривизны подложки). Используется собственное программное обеспечение.

Тщательная оптимизация конструкции реактора, с использованием компьютерного моделирования в компании Софт-Импакт, позволила достичь очень высоких скоростей роста соединений GaN, AIN, AIGaN и уменьшить длительность переходных этапов при росте сложных многослойных гетероструктур. В результате полная (от загрузки до разгрузки) продолжительность эпитаксиального процесса была сокращена в несколько раз по сравнению с типичными для стандартных реакторов и составила 2 часа 20 минут — 2 часа 45 минут для светодиодных гетероструктур на сапфировых подложках и 1 час 35 минут — 2 часа 20 минут для НЕМТ структур на подложках SiC. Оптимизированная конструкция реактора, в сочетании с многоточечным измерением скорости роста и изгиба эпитаксиальной пластины в реальном времени позволила достичь высоких значений однородности толщины (рис. 2) и электрофизических свойств эпитаксиальных структур (рис. 3).

На данной установке в течение последних лет проводится комплекс работ по оптимизации техноло-



Рисунок 2. Карта распределения толщины GaN на сапфировой подложке диаметром 100 мм.

гии эпитаксиального роста гетероструктур различного типа. Была разработана технология роста квантовых ям InGaN. Разработаны *in-situ* методы трансформации сплошных квантовых ям InGaN в массив изолированных островков и формирования квантовых точек InGaN. Разработана технология роста транзисторных GaN/AIN/AIGaN гетероструктур на подложках сапфира, карбида кремния и кремния и созданы структуры, имеющие подвижность более 2000 см²/В×с при концентрации в канале 1.3-1.5×10¹³ см⁻². Среднеквадратичные отклонение проводимости и толщины слоя по площади подложки составили менее 3.

За последние годы в созданном реакторе проводились также многочисленные эксперименты по выращиванию перспективных эпитаксиальных структур на



Рисунок 3 — Карта распределения слоевого сопротивления канала III-N HEMT структуры на SiC подложке диаметром 100 мм.

основе III-N соединений, в том числе, был разработан ряд нестандартных технологий, расширяющих спектр конструкций реализуемых эпитаксиальных структур:

 осаждения пассивирующих Si₃N₄ покрытий непосредственно в эпитаксиальном реакторе в продолжение единого эпитаксиального процесса;

выращивания НЕМТ структур с барьером InAIN;

- легирования буферных слоев углеродом и железом;
- селективной эпитаксии тонких сильнолегированных подконтактных областей;
- выращивания композитных графен III-N структур в едином эпитаксиальном процессе;
- эпитаксиального роста структур графен на сапфире (на подложках до 100 мм).

Разработки ФТИ им. А.Ф. Иоффе были использованы для опытного изготовления НЕМТ структур, которые были использованы российскими предприятиями для изготовления СВЧ транзисторов. Выращенный НЕМТ структуры процессировались в АО «Светлана-Электронприбор» (С.-Петербург), АО НПФ «Микран» (Томск), АО «НПП «Салют» (Н.Новгород), АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Москва), ФГУП «РНИИРС» (Ростов-на-Дону). Совместно с АО «Светлана-Электронприбор» была развита технология роста НЕМТ структур на отечественных подложках карбида кремния. На транзисторах, изготовленных в АО «Светлана-Электронприбор», были достигнуты токи насыщения до 1000 мА/мм, крутизна 220 мС/мм, удельная мощность 5-6 Вт/мм и выходная мощность 20 Вт на частоте 3 ГГц.



Рисунок 4. Транзисторов в оснастке для СВЧ измерений (АО НПФ «Микран».)

В АО НПФ «Микран» из выращенных ФТИ им.А.Ф. Иоффе гетероструктур на подложках карбида кремния были созданы транзисторы для диапазона частот 2.4 ГГц (рис. 4), имеющие в импульсном режиме выходную мощность 36 Вт, при плотности мощности 4 Вт/мм и КПД 34%. Импульсные измерения удельных параметров СВЧ транзисторов на пластине, проведенные на частоте 10ГГц методом согласованных нагрузок (Load Pull) показали удельные параметры, близкие к параметрам технологий ведущих производителей СВЧ GaN приборов. При напряжениях питания V_{ds}=33÷38 В были получены значения плотности выходной мощности Р_{зdb}=5÷6 Вт/мм. КПД по добавленной мощности составил более 45% при коэффициенте усиления более 14 дБ. С использованием гетероструктур InAIN/AIN/GaN были созданы транзисторы имеющие крутизну передаточной характеристики 450 мСм/мм при токе 1200 мА/ мм и максимальную частоту модуляции F_{max}=45 ГГц.

Публикации

- В. В. Лундин, , А. В. Сахаров, Е. Е. Заварин, Д. А. Закгейм, А. Е. Николаев, П. Н. Брунков, М. А. Яговкина, А. Ф. Цацульников, «Влияние метода формирования высокоомного буферного слоя GaN на свойства гетероструктур I. А. N/GaN и А. G. N/ GaN с двумерным электронным газом». Письма в журнал технической физики, 2018, том. 44, вып. 13, стр. 51-58.
- Karpov, S; Zakheim, D.; Lundin, W; Sakharov, A.; Zavarin, E.; Brunkov, P.; Lundina, E.; Tsatsulnikov, A. «Barrier height modification and mechanism of carrier transport in Ni/in situ grown Si3N4/n-G.N. Schottky contacts» Semiconductor Science and Technology, 2018, V. 33, №2, pp. 025009.
- Лундин В.В., Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Устинов В.М. «Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее», Научное приборостроение. 2017. том 27., вып. 1. стр. 5-9.
- А. Ф. Цацульников, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, М. А. Яговкина, А. В. Сахаров, С. О. Усов, В. Е. Земляков, В. И. Егоркин, К. А. Булашевич, С. Ю. Карпов, В. М. Устинов, «Влияние параметров гетероструктур А. N. GaN. A. GaN и A. N. GaN. I. AIN с двумерным электронным газом на их электрофизические свойства и характеристики транзисторов на их основе» ФТП, 2016, том. 50, вып. 10, стр. 1401-1407.
- W. V. Lundin A. V. Sakharov , E. E. Zavarin , D.Yu.Kazantsev , B.Ya. Ber , M.A. Yagovkina , P.N. Brunkov , A. F. Tsatsulnikov, «Study of GaN doping with carbon from propane in a wide range of M. V. E conditions», Journal of Crystal Growth, 2016, V. 449, pp.108–113.
- А. Ф. Цацульников, В. В. Лундин, А. В. Сахаров, Е. Е. Заварин, С. О. Усов, А. Е. Николаев, М. А. Яговкина, В. М. Устинов, Н. А. Черкашин «Эпитаксиальный рост гетероструктур G. N. AIN. I. AIN для НЕМТ в горизонтальных МОС-гидридных

реакторах различных конструкций» Физика и техника полупроводников, 2016, том 50, вып. 9, стр. 1263-1269.

- Тихомиров В.Г., Земляков В.Е., Волков В.В., Парнес Я.М., Вьюгинов В.Н., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф., Черкашин Н.А., Мизеров М.Н., Устинов В.М. «Оптимизация параметров НЕМТ-гетероструктур G. N. AIN.A. GaN для СВЧ транзисторов с помощью численного моделирования» ФТП, 2016, том. 50, вып. 2, стр. 245-249.
- В.В. Лундин Д.В. Давыдов, Е.Е. Заварин, М.Г. Попов, А.В. Сахаров, Е.В. Яковлев, Д.С. Базаревский, Р.А. Талалаев, А. Ф. Цацульников,

М. Н. Мизеров, В. М. Устинов, «МОС-гидридная эпитаксия I.I. N светодиодных гетероструктур с малой длительностью технологического процесса», ПЖТФ, 2015, том 41, вып. 5, стр. 9-17.

 В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, М. Г. Попов, С. И. Трошков, А. В. Сахаров, И. П. Смирнова, М. М. Кулагина, В. Ю. Давыдов, А. Н. Смирнов, А. Ф. Цацульников, «Влияние содержания алюминия на морфологию поверхности сильнолегированных мезаструктур (Al)GaN, сформированных селективной газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений», ПЖТФ, 2015, том. 41, вып. 20, стр. 74-81.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Базовые подразделения – лаборатория Масс-спектрометрии, лаборатория Физики адсорбционно-десорбционных процессов

Масс-спектрометрия — один из наиболее точных и универсальных методов исследования химического, элементного и изотопного состава вещества. Она зародилась более 100 лет назад, получила огромный импульс роста в годы атомных проектов, а в настоящее время является основным методом исследования биохимических процессов в живых организмах и главным технологическим инструментом в синтезе современных лекарственных препаратов. Ежегодно в мире продается масс-спектрометров более чем на 5 млрд. USD; а разработкой, совершенствованием и выпуском масс-спектрометров занимаются сотни частных компаний и академических лабораторий. Бывший президент АН СССР ак. А.П.Александров считал массспектрометрию важнейшей стратегической отраслью, а уровень ее развития — показателем технологического, а значит и геополитического уровня страны. В настоящее время массспетрометрия. в том числи приборы основанные на разработках ФТИ, используются для исследований в физике, химии, экологии, в медицине, а также в металлургии, атомной и фармакологической промышленности для контроля технологических процессов.

Масс-спектрометрия стала развиваться во ФТИ в конце сороковых годов XX века для аналитического обеспечения разделением изотопов урана в рамках Атомного проекта. Авторами первых публикаций были Николай Ильич Ионов и Борис Александрович Мамырин, которые в дальнейшем в течение многих лет определяли пути развития масс-спектрометрии и её применений, возглавляя отдел физической электроники и лабораторию масс-спектрометрии, соответственно. Были разработаны два новых типа динамических масс-аналиазторов, получившие признание во всём мире: магнитный резонансный масс-спектрометр и времяпролётный безмагнитный масс-спектрометр с отражателем, обычно называемый масс-рефлектрон. На сегодня последний стал основной мировой масс-спектрометрии, и в год выпускается много сотен приборов, основанных на идее масс-рефлектрона.



Рис. 1 Ионно-оптическая схема магнито-резонансного масс-анализатора

Разработка магнитных резонансных масс-спектрометров (МРМС) была начата во ФТИ в начале 50-х годов 20-го столетия, а их совершенствование продолжается до сих пор. По сути дела, принцип действия МРМС основан на зависимости циклотронной частоты движения ионов по круговой орбите в постоянном однородном магнитном поле от величины поля и отношения массы иона к его заряду. Это достаточно сложные приборы, обладающие чрезвычайно высокими аналитическими характеристиками.

Благодаря принципу действия магнитные резонансные масс-спектрометры обладают высокой чувствительностью. Так, их абсолютная чувствительность может составлять ≤ 10⁵ атомов ³Не в объёме камеры анализатора (~2 литра), а динамический диапазон (то есть отношение количеств двух исследуемых веществ, которые имеют близкие массы), например, при измерениях изотопного отношения ³Не^{+/4}Не⁺ в одном эксперименте, может достигать 10¹⁰ раз. Разрешающие способности созданных МРМС лежат в пределах от несколько тысяч до 350 тысяч на полувысоте массовой линии.

С помощью MPMC были осуществлены два варианта измерения магнитного момента протона в ядерных магнетонах, которые долгое время определяли погрешности, приписанные ряду электромагнитных постоянных. Результат второго измерения этой величины, полученной в ФТИ, $\mu_p/\mu_n = 2.7927744 \pm 0,0000012$ (± 0,43 ppm) остаётся самым точным прямым определением этой константы. Они также позволили определить период полураспада трития $T_{\mu_n} = (12,279 \pm 0,033)$ года (±0,27%) и определить изотопное отношение ³Не/⁴Не в атмосфере Земли, которое является своеобразной глобальной геофизической константой.

Изотопно-гелиевые измерения лежат в основе работ по геологии и геохронологии, материаловедению и исследованиям солнечного ветра, которые ведутся в



Рис. 2 Ионно-оптическая схема рефлектрона Мамырина

настоящее время в лаборатории Масс-спектрометрии. Гелиевые изотопные измерения твёрдых геологических образцов и воды из горных рек и ручьёв в Монголии изучаются совместно с сотрудниками института земной коры РАН (г. Иркутск); содержание изотопов гелия в ледяных кернах из скважины к озеру Восток в Антарктиде исследуется совместно с Арктическим и Антарктическим НИИ; взаимодействие дейтериевой плазмы с конструкционными материалами токамака Глобус-М и возможность оценки скорости наработки продуктов реакций ядерного синтеза исследуются совместно с сотрудниками лаборатории Физики плазмы; изучается влияние дислокационно-динамической диффузии гелия и других газов на механические и прочностные характеристики металлов или наноразмерных материалов.

Вторым типом масс-анализаторов, которые были разработаны в ФТИ, получили международное признание и широко применяются во многих областях науки и техники, стали времяпролётные масс-спектрометры с отражателем, которые были названы авторами (Б.А. Мамырин, В.И. Каратаев, Д.В. Шмикк, В.А. Загулин) масс-рефлектронами.

Идея работы масс-рефлектрона заключается в том, что он даёт возможность компенсировать разни-



Рис. 3 Ионно-оптическая схема масс-спектра с источником ионов типа ЭРИАД

цу во временах пролёта бесполевых участков дрейфа L_1 и L_2 , которая обусловлена разбросом энергий ионов в источнике с одним и тем же отношением массы к заряду M/q. Отражатель с двумя зазорами позволяет получить фокусировку второго порядка, необходимую для достижения высокой разрешающей способности при достаточно большом разбросе ионов по энергиям. Так как разрешающая способность времяпролётных масс-спектрометров R = M/ Δ M=T/2 Δ t, T = L(M/2qU)[%], где: I и T — длина траектории и полное время движения ионов с энергией U от источника до детектора, а Δ t –длительность (толщина) пакета ионов одного сорта на входе в детектор, то отсюда следует, что разрешающая



Рис. 4 Расчет сбора ионов d скиммер газодинамического интерфейса

способность таких приборов пропорциональна времени пролёта, то есть длине анализатора, а также массе ионов в степени ½.

С самого начала масс-рефлектроны стали использоваться как устройства для контроля быстро протекающих технологических процессов, в частности, для контроля процесса выплавки стали в конверторах с кислородным дутьём. В дальнейшем масс-рефлектроны стали использоваться для исследований в физике, химии, медицине, фармакологии, биологии, протеомике и других областях науки, особенно при работе с ионами, имеющими массы в тысячи, десятки и сотни тысяч а.е.м.

В настоящее время в Институте разработана и опробована на практике методика компенсации больших энергетических разбросов ионов, которая позволяет существенно увеличить разрешающую способность времяпролётных приборов примерно в два раза (то есть до 600 по основанию массовых пиков в массовой области 3-4 а.е.м. при длине анализатора менее одного метра), применение которой значительно повысит надёжность анализов топливных газовых смесей для термоядерных реакторов.

Огромную важность в масс-спектрометрии имеют не только устройства для масс-анализа, но и методы ионизации, т.к. именно они обеспечивают возможность помещения в высоковакуумную камеру атомов и



Рисунок 5. Трансформация масс-спектра азотнокислого уранила с ростом фрагментирующего напряжения

молекул для анализа. Лаборатория Физической электроники ФТИ под руководством Н.И. Ионова внесла огромный вклад в создания метода поверхностной термоионизации, изначально реализованного для задач атомного проекта, а сейчас широко используемого в мире и для атомных технологий, и для геохронологии и геологических измерений. Н.И. Ионов впервые создал системы с пространственно разнесенными источником пробы и нагретым эмиттером, что сейчас является общепринятым стандартом в мире.

Новый тип источника ионов на основе поверхностной термоионизации с повышенной стабильностью работы был предложен сотрудниками ФТИ (Н.М. Блашенков, Н.Р. Галль) для масс-спектрометра МТИ-350Т, созданного Росатомом РФ в рамках программы «Альянс». Поверхностная термоионизация стала мощным методом изучения процессов на поверхности твердых тел, в частности определения такой важнейшей характеристики, как уровень химпотенциала электронов (работы выхода). С ее помощью проведено изучение поверхностных фазовых переходов, двумерных и трехмерных, приводящих к росту одно – или многослойного графена на поверхности металлов (Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль) [1].

Был предложен и практически реализован новый метод элементного и изотопного анализа — ЭРИАД, или электрораспыление с управляемой атомизацией в источнике. Он основан на источнике ионов — электроспрей, открытом в СССР в 1983 году и в настоящее время широко используемом в мире для биохимических исследований. Однако основные физико-химические процессы, протекающие при транспорте ионов от области распыления в масс-спектрометр, оставались не понятыми.

Проведенные исследования позволили установить механизм фрагментации ионов в газодинамическом интерфейсе и предложить практическую схему фокусировки ионов в газонаполненной среде, обеспечивающую их сбор вплоть до 50-70% в широком диапазоне массовых числе одновременно. На базе этих работ существенно повышена чувствительность серийных масс-спектрометров, разработка внедрена в международных корпорациях Shimadzu corp. (Япония) и LECO Inc. (США).

Важнейшим направлением работы в области



Рис. 6 Ионно оптическая схема масс-анализатора для одновременного измерения всех компонент выдыхаемого воздуха

масс-спектрометрии является разработка приборов для медицины. В настоящее время в каждой больнице США используется не менее одного, а в среднем порядка трех масс-спектрометров. В ФТИ был разработан автоматизированный статический магнитный масс-спектрометр с двойной фокусировкой, построенный по так называемой S-схеме, близкой к классической схеме Маттауха-Герцога (Рис. 3). Она позволяет создавать приборы с минимальными геометрическими размерами, но высокими аналитическими параметрами, в частности, за счет одновременной регистрации всего пула ионов, выходящих из источника. Масс-спектрометр предназначен для диагностики



Рисунок 7. Специализированный изотопный масс-спектрометр для диагностики инфицированности человека Helicobacter Pillory



Рисунок 8. Специализированный масс-спектрометр для элементного и изотопного измерения легких элементов (Li, Be, Na, Mg, Al) методом ЭРИАД построенный по технологии МСплатформа ообращения и эндокринной системы пациентов. Вес прибора 25 кг, габариты: 250 x 450 x 650 мм³.

заболеваний по составу выдыхаемого воздуха и обладает следующими аналитическими характеристиками: разрешающая способность на 10% высоты массового пика ≥ 200, массовый диапазон 30 — 200 а.е.м., пределы обнаружения летучих компонент от ppm до десятков ppb за счет системы ввода пробы с применением тонких полидиметилсилоксановых мембран. Это позволяет измерять большое число летучих газовых компонент в выдыхаемом воздухе и более надёжно осуществлять раннюю диагностику заболеваний органов дыхания, кров

Другим масс-спектрометром, созданным в ФТИ для медицины, явился прибор для реализации изотопного дыхательного теста — «золотого стандарта» ВОЗ для диагностики инфицированности человека Helicobacter pylori и оценки эффективности эрадикационной терапии. Прибор позволяет измерять изотопные отношения 13С/12С с точность порядка 0.1% и уже используется как для диагностики в экспериментальной медицине, так и для научных исследований. Важной научной и практической задачей является количественное определение биологически активных микроэлементов в теле человека, животных и растений, а также измерение их изотопного состав. На сегодня это технически сложная задача, и в мировой масс-спектрометрии нет единого прибора, пригодного для ее непосредственного выполнения.

В ФТИ был предложен новый метод решения указанной задачи на основе масс-спектрометрии ЭРИАД — электрораспыления с управляемой атомизацией в источнике ионов. Совместно со специалистами Института аналитического приборостроения РАН и ООО «МС-био» создан прототип масс-спектрометра МИ-20 LowMass, предназначенного для количественного определения легких элементов, от лития до магния, и для измерения изотопного состава лития, в том числе в биологических пробах.

Публикации

- E. V. Rut'kov, N. R. Gall Measurement of Actual Temperature for a Polylayer Graphene Film on a Metal. Surf.Sci. 2016, v.645C, pp.63-66
- А. Н. Баженов, С. В. Булович, Л. Н. Галль А. В. Кретинина, М. Н. Лапушкин, Н. Р. Галль Механизм молекулярной фрагментации и атомизации ионов в газодинамической транспортирующей ячейке ПЖТФ, 2010, Т. 36, No. 7, с. 45–53.
- L.N. Gall, N.S. Fomina, R.Giles, S.V. Masukevich,
 O.A. Beliaeva, N.R. Gall Electrospray mass spectrometry with controlled in-source atomization (ERIAD) as a promising elemental method: evaluation of analytical features. Eur.
 J. Mass Spectrom. 2015, Vol. 21, No. 4, pp 353-359
- Фомина Н. С., Масюкевич С. В., Галль Л. Н., Галль Н. Р. Осцилляции тока электрораспыления с одновременной визуализацией формы конуса Тейлора, Масс-спектрометрия, 2015, вып 4.
- Блашенков Н. М., Шешеня Е. С., Соловьев С. М., Галль Л. Н., Саченко В. М., Заруцкий И. В., Галль Н. Р. Разработка специализированного изотопного масс-спектрометра для неинвазивной диагностики инфицированности человека Helicobacter Pylori ЖТФ, 2013, Vol. 83, No. 6, pp. 60–65.

ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ

Базовое структурное подразделение — лаборатория Атомной Радиоспектроскопии.

Оптическая квантовая магнитометрия — быстро развивающееся направление прикладной физики, использующее резонансные оптические методы управления спиновыми состояниями атомов как в газовой фазе, так и в твердом теле. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся работы по разработке новых методик применения оптически детектируемого магнитного резонанса в задачах измерения магнитного поля, и создаются прототипы магнитометров — устройств для измерения параметров вектора магнитного поля.

В лаборатории Атомной Радиоспектроскопии ФТИ им. А.Ф. Иоффе разрабатываются устройства, позволяющие осуществлять прецизионные измерения индукции магнитного поля — квантовые магнитометры с оптической накачкой, характеризующиеся не достигнутым более нигде в мире сочетанием кратковременной чувствительности, точности и быстродействия.



Рис.1. Распределение магнитометрических устройств по метрологическим параметрам; стрелкой отмечено общее направление развития.

Оптические квантовые методы измерения магнитного поля основаны на эффектах оптической накачки и оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР), известных с середины XX века. Мощный толчок развитию квантовых магнитометрических методов дало создание компактных полупроводниковых лазеров, в частности — лазеров с вертикальным резонатором.

Оптические квантовые магнитометры не имеют себе равных по абсолютной точности. При этом по вариационной чувствительности они могут превосходить даже магнитометры на основе сверхпроводящих квантовых датчиков — СКВИД, и при этом не требуют громоздкого и крайне дорогостоящего гелиевого рефрижераторного оборудования.

Коллектив лаборатории под руководством академика РАН Е.Б. Александрова имеет опыт работ в области квантовой магнитометрии, восходящий к 60-м годам прошлого века; до 1998 г работы велись в ГОИ им С. И. Вавилова в лаборатории Е.Б. Александрова и в ФТИ им. А.Ф. Иоффе группой Р.А. Житникова, с 1998 г. — во вновь созданной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе лаборатории атомной радиоспектроскопии. К настоящему времени участниками коллектива разработан ряд методик измерения параметров магнитного поля, и созданы прототипы квантовых магнитометров с оптической накачкой, характеризующиеся не достигнутым более нигде в мире сочетанием кратковременной чувствительности, точности и быстродействия.

Среди них:

- Магнитометр МХ-типа на парах атомов калия (КМОН), или просто калиевый Мх-магнитометр. Его предельная чувствительность при лазерной накачке достигает при использовании в качестве чувствительного элемента газовой ячейки Ø15 см с разработанным в ГОИ им. С.И. Вавилова (лаб. Е.Б. Александрова) антирелаксационным покрытием 2 фТл×Гц-1/2, типичная чувствительность при ламповой накачке при использовании ячейки Ø5 см достигает 0.5 пТл×Гц-1/2, абсолютная точность — 20 пТл. Основной конкурент КМОН — цезиевый магнитометр уступает КМОН по этому параметру примерно на два порядка, а имеющий схожую абсолютную точность щелочно-гелиевый магнитометр на два порядка уступает КМОН в чувствительности, и на порядок — в быстродействии.
- Цезий-калиевый тандем на четырехквантовом резонансе в ³⁹К — устройство, объединяющее быстродействие и разрешающую способность цезиевого Мх-магнитометра с абсолютной точностью и воспроизводимостью, достижимой при использовании узких многофотонных линий в структуре калия.
- Рубидиевый балансный СТС магнитометр устройство, измеряющее разность частот между двумя переходами в СТС структуре атома рубидия; характеризуется абсолютной точностью на уровне 10 пТл и работоспособностью при любых ориентациях вектора магнитного поля, т.е. отсутствием «мертвых зон»;
- Квантовый магнитометр парах атомов калия с оптической накачкой, использующий две компоненты сигнала прецессии магнитного момента. Характеризуется абсолютной точностью на уровне 2÷3 пТл при чувствительности на уровне 0.5 пТл×Гц^{-1/2}.



Рисунок 2. Калиевый Мх-магнитометр (лабораторный прототип). 1 — датчик, 2, 3 — оптоволокна, 4, 8 — соединительные кабели, 5 — спектральная лампа, 6 — фотоприемник, 7 — процессорный блок, 9 — блок питания с интерфейсным выходом.

Векторные магнитометры и вариометры на базе КМОН — устройства, способные одновременно измерять абсолютные величины и/или вариации трех компонент вектора магнитного поля. Разработаны и испытаны прототипы калиевого и цезиевого вариометров, характеризующиеся чувствительностью в компонентах на уровне 10 пТл за 0.1 с. Предложен метод измерения трех компонент вектора магнитного поля с абсолютной точностью ±0.1 нТл при времени измерения 0.1 с.

Все перечисленные выше устройства используют в качестве чувствительного элемента ячейку с атомами щелочных металлов в газообразной фазе. Линейные размеры такой ячейки могут варьироваться от двух до пятнадцати сантиметров — устройства с большими ячейками отличаются более высокой (пропорционально корню из объема ячейки) чувствительностью, но худшим (пропорционально линейному размеру) пространственным разрешением. В таких приложениях, как геологическая разведка, охранение важных объектов, мониторинг магнитного поля Земли, достаточно пространственного разрешения в десятые доли метра; в то же время в ряде приложений, в первую очередь — в биологии и медицине, требуется сантиметровое и даже субмиллиметровое разрешение.

Поэтому в последние годы в лаборатории ведется интенсивное изучение возможностей компактизации магнитометрических датчиков. С этой целью



Рисунок 3. Датчик векторного цезиевого вариометра (лабораторный прототип).

проводится исследование новых лазерных методов ОДМР, а также — исследование ОДМР в твердотельных структурах, а именно — в азотно-вакансионных центрах (NV центрах) окраски в кристалле алмаза. И хотя особенности оптической накачки в этих уникальных структурах были за последние пятнадцать лет исследованы десятками групп по всему миру, нам удалось создать новые методики применения ОДМР в NV центрах к задаче измерения компонент вектора магнитного с субмиллиметровым разрешением. В результате на лабораторном стенде была продемонстрирована чувствительность на уровне 1 нТл при объеме чувствительного элемента 0.01 мм³ (0.3×0.3×0.1 мм).

 Микроразмерный квантовый трехкомпонентный магнитометр на основе NV центров в кристалле алмаза с чувствительностью порядка 1 нТл при объеме чувствительного элемента 0.01 мм³ (лабораторный стенд).

Здесь важно отметить, что магнитное поле диполя при удалении от него спадает пропорционально кубу расстояния, поэтому при исследовании малых по сравнению с размером датчика источников приближение центра датчика к объекту в сто раз (1 см → 0.1 мм) эквивалентно повышению чувствительности в 10⁶ раз.

Еще одна разработка в направлении компактизации и увеличения пространственного разрешения, в настоящее время осуществляемая лабораторией совместно с Институтом когнитивных нейронаук и Центром биоэлектрических интерфейсов НИУ ВШЭ:

Сверхчувствительный сверхкомпактный датчик



Рисунок 4. Датчик микроразмерного магнитометра на азотновакансионных центрах. 1 — оптоволокно, 2 — кристалл алмаза, 3 — оптически прозрачный клей, 4 — светоотражающее покрытие, 5 — СВЧ антенна.

для применения в магнитоэнцефалографических установках (лабораторный стенд).

Магнитоэнцефалография (МЭГ) — стремительно развивающаяся неинвазивная технология регистрации электрической активности головного мозга, характеризующаяся высоким временным разрешением и позволяющая изучать быстро протекающие нейрональные процессы, не нарушая целостность тканей; она предъявляет крайне высокие требования к датчикам магнитного поля: чувствительность не хуже 10 фТл×Гц^{-1/2} полоса частот не менее 100 Гц при площади основания датчика не более 1 см², и расстояние от чувствительного элемента до поверхности исследуемого объекта — не более 1÷2 см; последнее требование обусловливает потенциальное преимущество оптических датчиков в задачах МЭГ перед датчиками СКВИД. Достижение совокупности требуемых параметров оказывается возможным при использовании нелинейных методов лазерной накачки. На конференции ICLO 2018 были доложены первые экспериментальные результаты, подтверждающие реализуемость таких датчиков. В отличие от параллельно ведущихся на Западе разработок, наши датчики для своей работы не требуют обеспечения нулевого поля, что существенно упрощает и удешевляет структуру комплекса МЭГ.

Задачи разработки квантовых магнитометров тесно переплетены с другими прикладными задачами квантовой оптики — задачами разработки квантовых стандартов времени и частоты, прецизионных квантовых измерителей угла и скорости вращения. Лаборатория Атомной Радиоспектроскопии ФТИ им. А.Ф. Иоффе принимает участие в работах по всем этим направлениям совместно с НИУ ВШЭ, ЦНИИ «Электроприбор», СПбПУ и АО РИРВ. Магнитометры-прототипы, созданные совместно с ГОИ им. С.И. Вавилова, успешно проходили тестирование в Институте фотоники (Йена, Германия) и Королевском институте метеорологии (Дурб, Бельгия), и используются в эталоне магнитного поля ВНИИМ, а также в магнитометрических обсерваториях ИЗМИРАН, входящих в систему INTERMAGNET.

Публикации

- Е. Б. Александров, А. К. Вершовский. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии. УФН, том 179, вып.6, стр.605-637 (2009).
- А. К. Вершовский, А. С. Пазгалев. Квантовый магнитометр с оптической накачкой, использующий две компоненты сигнала прецессии магнитного момента. – Письма в ЖТФ, том 37, вып. 1, стр. 48-55 (2011).
- А. К. Вершовский. Проект векторного квантового МХ-магнитометра с лазерной накачкой. – Письма в ЖТФ, том 37, вып.3, стр.93-101 (2011).
- А. К. Вершовский, С. П. Дмитриев, А. С. Пазгалев. Квантовый магнитометр с оптической накачкой, комбинирующий достоинства Мх и Мz устройств. – ЖТФ, том 83, вып. 10, стр. 90-97 (2013).
- А. К. Вершовский, А. К. Дмитриев. Микроразмерный квантовый трехкомпонентный магнитометр на основе азотно-вакансионных центров окраски в кристалле алмаза. Письма в ЖТФ, том 41, вып.8, стр.78-85 (2015).
- A. K. Dmitriev, A. K. Vershovskii. Concept of a microscale vector magnetic field sensor based on nitrogen-vacancy centers in diamond. – JOSA B., v.33, no.3, pp. B1-B4 (2016).

ЛИНЕЙКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ЭПР, ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО ЭХА И ДВОЙНЫХ РЕЗОНАНСОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ, ЗОНДОВО-ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Базовое подразделение — лаборатория Микроволновой спектроскопии кристаллов

В Институте выполняются фундаментальные радиоспектроскопические исследования широкого спектра перспективных материалов, а также разработка новых экспериментальных методов магнитно-резонансной спектроскопии и современной приборной базы для изучения и диагностики полупроводниковых и диэлектрических материалов и наноструктур. Методы магнитного резонанса являются чрезвычайно информативными инструментами неразрушающей диагностики материалов, включая биологические системы.

Основные направления применения ЭПР спектроскопии:

- анализ и неразрушающая диагностика полупроводниковых материалов и наноструктур на их основе, включая приборные структуры для микро – и оптоэлектроники, спинтроники;
- исследование и контроль материалов, перспективных для применений в фотовольтаике, процессов разделения зарядов в системах для солнечной энергетики, включая гибридные органические-неорганические устройства, а также био-неорганические структуры на основе интегрирования в твердотельные ячейки для фотовольтаики протеинов, участвующих в биологическом фотосинтезе;
- исследование спиновых свойств/ манипуляция спинами в устройствах для спинтроники и квантовых информационных технологиях, включая устройства на основе единичного квантового объекта: единичной молекулы, единичного дефекта, единичной квантовой точки;
- высокоточное обнаружение веществ с малыми концентрациями, в том числе канцерогенных и ядовитых, взрывчатых, наркотических и т.д., определение их состава.;
- анализ геологических пород в различных

месторождениях (нефть, алмазы, металлические руды, минеральные удобрения и т.д.).

Огромное значение применений ЭПР спектроскопии в биологии и медицине рассмотрено стр.392

Магистральным направлением развития современных технологий является миниатюризация элементной базы микро – и оптоэлектроники. Господствующим технологическим сценарием является уменьшения числа электронов, необходимых для работы транзистора, вплоть до одного электрона. Любой прибор с наноразмерными характеристиками неизбежно будет проявлять элементы квантового поведения. Создание новых наноматериалов и нанотехнологий, миниатюризация современной приборной базы требует учета и использования квантовомеханических законов, при этом спин, будучи чисто квантовомеханическим объектом, начинает играть важную, а часто и решающую роль в работе устройств на основе наноструктур, включая и процессы в нанобиологических системах. На спиновых явлениях основан один из самых мощных аналитических методов, доступных сегодня для физиков, химиков, биологов, геологов и других специальностей — метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и его развитие в виде электронного спинового эха (ЭСЭ), двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР), оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) и электрически детектируемого магнитного резонанса (ЭДМР). Для диагностики эффективных масс носителей в приборных наноструктурах весьма перспективно применение техники высокочастотного оптического детектирования циклотронного резонанса (ОДЦР), ранее открытого сотрудниками лаборатории Микроволновой спектроскопии кристаллов Института. Микроволновое и радиочастотное излучение, используемое в радиоспектроскопии, проникает внутрь исследуемых материалов, что дает возможность осуществлять их неразрушающую диагностику.

ЭПР был обнаружен в 1944 г. Е.К. Завойским [Zavoisky, E.K.: Relaxation of liquid solutions for perpendicular fields. J. Phys. (USSR) 9, 211–216 (1945)] в Казани и развился с крупное научное направление и экспериментальную технику. Первое наблюдение ЭПР было сделано в радиочастотном диапазоне, а результаты



Рисунок 1. Общий вид спектрометра ЭПР/ЭСЭ/ ОДМР нового поколения, созданного в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в рамках проектов ФЦП. Спектрометр включает высокочастотные микроволновые блоки и магнитооптический криостат с замкнутым циклом, установленный на оптический стол. Внизу справа показан один из вариантов интерфейса монитора с записью спектра ЭСЭ некрамерсовых ионов Tb³⁺ на частоте 94 ГГц в монокристалле YAG при температуре 1.5 К с переходом магнитного поля через нулевое значение. Справа внизу показаны для сравнения спектры ЭПР ионов Fe³⁺ в кристалле TiO₂, зарегистрированные в одном и том же образце на частоте 94 ГГц на спектрометре ФТИ (верх) и на промышленном спектрометре Elexsys 680 Bruker.

Научное и функциональное приборостроение

Завойского интерпретировались Я. Френкелем (ФТИ) [Frenkel, J.: On the theory of relaxation losses, connected with magnetic resonance in solid bodies. J. Phys. (USSR) 9, 299–304 (1945)] как проявление парамагнитного резонансного поглощения.

Основной целью разработки приборной базы современной ЭПР-спектроскопии является увеличение чувствительности и информационного содержания, а также получения возможностей спиновых манипуляций в условиях окружающей среды. Эти проблемы решается одновременно по нескольким направлениям, при этом основными являются увеличение рабочих частот ЭПР спектроскопии и использование двойных резонансов [см., например, Р.G. Baranov, H.-J. von Bardeleben, F. Jelezko, J. Wrachtrup; "Magnetic Resonance of Semiconductors and Their Nanostructures: Basic and Advanced Applications": Springer Series in Materials Science, Volume 253, 535 pages, Springer-Verlag GmbH Austria 2017].

В ОДМР и ЭДМР спиновое состояние переносится



Рисунок 2. Унифицированная блок-схема микроволнового блока. Общий вид генераторов диапазонов 3 мм (W) и 2 мм (D). Схематическое представление микроволновой вставки на основе новой конструкции квази-резонаторной системы с использование круглого волновода. Приведены примеры спектров ЭПР и ЭСЭ ионов Ce³⁺, Gd³⁺ и Tb³⁺, зарегистрированные в кристалле иттрий алюминиевого граната YAG: Ce, Gd, Tb, используемого в качестве сцинтиллятора в современных приборах медицинской диагностики.



Рисунок 3. Один из вариантов сканирующего зондово-оптического спектрометра магнитного резонанса, настроенного на исследования ОДМР NV центров в алмазе. Блок-схема сканирующего зондово-оптического спектрометра магнитного резонанса, созданного в рамках ФЦП совместно с российской компанией НТ МДТ.

в состояние фотона или заряда, соответственно. В ОДМР наблюдается гигантское увеличение чувствительности, так как энергия оптического кванта на несколько порядков выше энергии микроволнового кванта, в результате становится возможным обнаружить очень небольшое число спинов вплоть до единичного спина [Köhler et al., Nature 363, 242–244 (1993); Wrachtrup et al., Nature 363, 244–245 (1993)]. Непрерывный ЭПР и импульсный магнитный резонанс являются взаимодополняющими и применение обоих дает более общую картину исследуемых спиновых явлений.

До недавнего времени практическое применение полупроводников включало использование ансамблей зарядов и спинов носителей. Предельным объектом миниатюризации является устройство на основе единичного атома, единичной молекулы, единичного дефекта и этот фантастический сценарий начинает реализовываться в настоящее время с использованием центров окраски в алмазе и карбиде кремния. В результате созданы источники одиночных фотонов, впервые появилась реальная возможность производить квантовые манипуляции с одиночными электронными и ядерными спинами, проводить наноразмерное магнитное и температурное зондирование с применением малых массивов спиновых центров и индивидуальных электронных спинов, при комнатных температурах. Для всех перечисленных применений необходимо создание приборной базы нового поколения.

Новый инновационный радиоспектроскопический приборный комплекс, разрабатываемый в лаборатории Микроволновой спектроскопии кристаллов Института, предназначен для исследования и неразрушающего контроля конденсированных материалов, включая наноструктурные и биологические объекты. Упомянутый комплекс состоит из двух основных взаимодополняющих систем: высокочастотного ЭПР, ЭСЭ, ОДМР с одной стороны и магнитного резонанса, совмещенного с оптической конфокальной и атомно-силовой микроскопией, с другой, впервые в мировой практике объединенных вместе, что предполагает уникальный эффект синергии, то есть взаимно усиливающий эффект от такого объединения отдельных частей комплекса.

Высокочастотная система (см. Рис. 1, 2) предполагает:

 использование малогабаритных и унифицированных микроволновых блоков, изготовленных на единой платформе, объединяющих систему генерации микроволновой мощности, систему регистрации отраженного сигнала, возможность работы в непрерывном и импульсном режимах;

- работу в непрерывном и импульсном режимах;
- использование единого аппаратного и программного обеспечения;
- возможность работы на фиксированной высокостабильной частоте и с использованием перестраиваемого по частоте генератора, управляемого напряжением;
- возможность быстрой смены микроволновых диапазонов, путем замены микроволновых блоков без изменения работы всех основных узлов прибора;
- использование магнитно-оптического криостата замкнутого цикла, то есть отсутствие необходимости использования дорогостоящих криогенных жидкостей и развитой инфраструктуры для их производства;
- возможность быстрого сканирования с малым шагом (0.01 мТл) в широком диапазоне магнитных полей (от +7 Тл до – 7 Тл) с переходом через ноль;
- широкий легко перестраиваемый температурный диапазон от 1.5 до 300 К;

- простоту настройки с отсутствием сигнала background;
- возможность снять ограничения для размеров и формы образца;
- возможность вращения образца путем вращения цилиндрической волноводной системы и возможность автоматизации вращения образца на определенный угол.

На Рисунках 1 и 2 представлена информация по спектрометру ЭПР/ЭСЭ/ОДМР диапазонов 3 мм (94 ГГц) и 2 мм (130 ГГц) диапазонов.

Сканирующий зондово-оптический спектрометр магнитного резонанса (Рис. 3) предназначен для исследования и диагностики малых массивов дефектов вплоть до одиночных центров в малых объемах вещества, вплоть до нанометровых размеров, методами: (i) атомно-силовой микроскопии; (ii) конфокальной микроскопии и спектроскопии; (iii) оптически-детектируемого магнитного резонанса.

Регистрация ОДМР осуществляется с помощью синхронного детектирования, которое позволяет выделить изменения интенсивности люминесценции, синхронные с модуляцией микроволновый мощности, микроволновой частоты или магнитного поля (Рис. 4).

Рисунок 4. (а) Синхронное детектирование изменений ФЛ вблизи антипересечения уровней спиновых центров в SiC (В = 1.25 мТл) при применении слабого осциллирующего магнитного поля, записанное при различных температурах. (b) Сигналы с синхронного детектора, зарегистрированные в различных магнитных полях (правая ось) с ступенчатым увеличением магнитного поля в диапазоне нТл при T = 300 К.



КОМПЛЕКС МЕТОДИК И СРЕДСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Базовое подразделение — лаборатория Фотоэлектрических преобразователей

Солнечная возобновляемая энергетика в последние десятилетии демонстрирует увеличение объемов и номенклатуры вводимых в эксплуатацию электрических мощностей, рост производства солнечных батарей различных типов и расширение спектра научно-исследовательских работ по созданию новых типов фотоэлектрических преобразователей. Перспективные солнечные энергосистемы нового поколения строятся на основе высокоэффективных наногетероструктурных солнечных элементов (СЭ) каскадного типа (в частности, трехкаскадных InGaP/InGaAs/Ge преобразователей с КПД более 40%), работающих с концентраторами солнечного излучения при кратности концентрирования излучения 500-1000. Развитие фотоэлектрического рынка требует обеспечения проводимых работ необходимыми и обязательными процедурами подтверждения заявляемых характеристик фотоэлектрической продукции, контроля отдельных компонентов и систем в целом.

По мере разработки новых типов СЭ и развития технологических мощностей для солнечных батарей оказалось очевидным, что доступные стандартные методики и средства измерений уже не учитывают многие специфические особенности перспективных типов исследуемых объектов, прежде всего создаваемых на основе А³В⁵ полупроводниковых наногетероструктур каскадного типа и концентраторов излучения, и не отвечают ряду требований к условиям оценивания их характеристик. Это определило актуальность развития экспериментальной и метрологической базы для индустрии фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения.

Лаборатория Фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А. Ф. Иоффе является признанным лидером в области разработки методик для исследования полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения и специализированного оборудования. Важнейшим результатом работы Лаборатории является комплекс взаимосвязанных методик, базирующийся на экспериментальных средствах и оборудовании собственного производства.

Реализуемые в ФТИ им. А. Ф. Иоффе исследования

и разработки показывают, что гармоничное сочетание качественных лабораторных методик с квалифицированными натурными измерениями, их объединение в научно-обоснованную экспериментальную систему обеспечивает достижение качественно нового уровня в области измерений и квалификации новых типов СЭ, оптических элементов концентрации излучения, модулей и установок. Формирование элементной и создание метрологической баз для солнечной энергетики, постановка и внедрение систем контроля и методик аттестации фотопреобразователей излучений, дает новый импульс для расширения сфер применения указанных приборов и систем.

Установка для исследования спектральных характеристик многопереходных солнечных элементов

Установка предназначена для измерения спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа СЭ на основе многослойных гетероструктур, в том числе многопереходных в диапазоне длин волн 300-1900 нм (рис.1), коэффициентов зеркального отражения и нормального пропускания. Определение значений внешнего квантового выхода в абсолютных единицах производится путем сравнения фотооткликов исследуемого СЭ и контрольного фотоприемника при попадании на них модулированного по частоте монохроматического излучения. Измерение спектральных зависимостей отдельных переходов многопереходного ФЭП производится с варыируемым шагом сканирования 5-50 нм в условиях засветки светодиодами повышенной яркости.

Измерение спектрального коэффициента зеркального отражения для образца производится методом сравнения фототоков контрольных фотоприемников при попадании на них монохроматического излучения, причем на второй контрольный фотоприемник излучение попадает после отражения от исследуемого образца. Измерение спектрального коэффициента пропускания производится аналогичным методом, при этом второй контрольный фотоприемник регистрирует световой поток, прошедший через исследуемый образец. Задание режимов работы установки, управление процедурой измерения и обработка полученных значений осуществляется с помощью специализированной программы. Результаты измерений представляются в графическом и табличном видах.



Рисунок 1. Установка для исследования спектральных характеристик многопереходных СЭ (фото) и оптические конфигурации при измерении спектральных зависимостей: внешней квантового выхода фотоответа (а), коэффициентов отражения (б) и пропускания (в).

Научно-технические и конструкционные решения, реализованные в установке, дают возможность решать задачи всестороннего комплексного исследования спектральных характеристик многопереходных СЭ, антиотражающих покрытий и оптических материалов.

Много функциональные импульсные тестеры для характеризации наногетероструктурных солнечных элементов

Тестеры предназначены для проведения исследований солнечных элементов (СЭ) на основе многослойных наногетероструктур в режимах меняющейся энергетической освещенности и спектрального состава излучения (рис.2). Тестеры построены на базе многоламповых импульсных имитаторов солнечного излучения, позволяющих моделировать стандартный спектр солнечного излучения (класс А) или облучать СЭ в режимах активного (глубокого) варьирования спектрального состава излучения. В период короткого (до 1,5 мсек) светового импульса производится запись нагрузочной вольт-амперной характеристики (ВАХ) СЭ. В зависимости от решаемых задач возможна эксплуатация тестера в одном из следующих режимов:

Режим А: Моделирование спектрального состава излучения и энергетической освещенности в течение одного светового импульса. В период «плоской» части светового импульса измеряется вся ВАХ. Режим используется для исследования СЭ с малым временем жизни фотогенерированных носителей. Освещенность в плоскости расположения образца варьируется путем изменения расстояния между осветителем и элементом (на образце малого размера достигается



Рисунок 2. Многоламповые многофункциональные импульсные тестеры

Научное и функциональное приборостроение

плотность потока излучения эквивалентная 5000 крат). Неравномерность распределения облученности в плоскости испытаний составляет не более 3-5%.

Режим В: Моделирование спектрального состава излучения и энергетической освещенности в течение одного светового импульса. В момент окончания «плоской» части импульса измеряется одна пара значений «ток-напряжение». Вся ВАХ формируется за несколько (15-25) световых вспышек. Данный режим предназначен для измерения солнечных элементов с большим временем жизни неравновесных носителей заряда.

Импульсный тестер для концентраторных фотоэлектрических модулей.

Тестер предназначен для измерения и записи вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотоэлектрических модулей с концентраторами солнечного излучения и солнечными элементами на основе многопереходных наногетероструктур (рис.3). Тестер построен на основе импульсного имитатора с плотностью мощности излучения 1 кW/м² в рабочей области размером 1000 x 500 мм² при спектре излучения АМ 1,5D. В период светового импульса воспроизводится спектр, освещенность и угловая расходимость (32 угл. минуты) солнечного излучения в плоскости расположения концентрирующей оптики. Световой поток от двух независимых источников формируется оптическими коллиматорами с апертурой 60 х 60 см каждый. В течение одного светового импульса измеряется вся вольт-амперная характеристика. Неравномерность распределения освещенности в рабочей области не более 5%.

Многоламповый импульсный тестер полноразмерных солнечных батарей

Тестер (рис.4) предназначен для измерения ВАХ солнечных батарей площадью до 3 х 2 м² при освещении неколлимированным световым потоком со спектральным составом соответствующим внеатмосферному

или наземному солнечному излучению. Энергетическая освещённость контролируется калиброванным солнечным элементом с фоточувствительностью аналогичной элементам, составляющим солнечную батарею. В тестере используется активная электронная нагрузка, что позволяет регистрировать как прямую, так и обратную ветвь вольт-амперной характеристики, в том числе и без освещения. Длительность измерения световой характеристики 1.5 мсек, длительность одного цикла измерений «темновая характеристика + световая характеристика» — 3 мсек. Тестер построен на основе 8-ми лампового импульсного имитатора солнечного излучения, обеспечивающего регулируемую в пределах 800-1400 Вт/м² энергетическую освещённость в плоскости расположения солнечной батареи.



Рисунок 3. Импульсный тестер для концентраторных фотоэлектрических модулей



Рисунок 4. Многоламповый импульсный тестер солнечных батарей

Высокоэффективные каскадные СЭ рассматриваются как необходимая элементная база для развития космической солнечной энергетики и как перспективная при наземных применениях. Особенности работы этих устройств диктуют новые более жесткие требования к специализированному лабораторному и производственному метрологическому оборудованию. Универсальный подход к конструированию исследовательского оборудования позволил создать семейство приборов, успешно применяемых как в научных исследованиях, так и для контроля продукции в производственных условиях, что даёт возможность производить не только высокоточные измерения характеристик концентраторных СЭ и модулей с концентраторами излучения, но и обеспечивает корректное моделирование различных режимов их работы, что, в свою очередь, обеспечивает прогнозируемость характеристик СЭ и солнечных батарей для реальных условий эксплуатации.

Публикации

- M.Z.Shvarts, A.E.Chalov, E.A.Ionova, V.R.Larionov, D.A. Malevskiy, V.D.Rumyantsev, S.S.Titkov "Indoor characterization of the multijunction III-V solar cells and concentrator modules", *Proceedings of the* 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, June 2005, pp. 278-281, ISBN: 3-936338-19-1.
- V.D.Rumyantsev, V.M.Andreev, V.R.Larionov, D.A. Malevskiy, M.Z.Shvarts "Indoor characterization of multijunction concentrator cells under flash illumination with variable spectrum", Proc. of the Fourth Int. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, El Escorial, Spain, 2007, pp. 277-280, ISBN: 978-84-690-6463-4.
- V.D.Rumyantsev, V.R.Larionov, D.A.Malevskiy, P.V.Pokrovskiy, A.V.Chekalin, M.Z.Shvarts, "Evaluation of the Solar Cell Internal Resistance in I-V Measurements under Flash Illumination", Proceedings of the 8th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-8), April 16-18, 2012, Toledo, Spain, pp. 152-156.
- В. Р. Ларионов, Д. А. Малевский, П. В. Покровский, В. Д. Румянцев «Измерительные комплексы для исследований солнечных фотоэлектрических преобразователей каскадного типа и концентраторных модулей на их основе», ЖТФ, т.85, вып. 6, 2015, стр. 104-110, ISSN: 0044-4642. Перевод: V.R.Larionov, D.A.Malevskii, P.V.Pokrovskii, V.D.Rumyantsev «Measuring Complex for Studying Cascade Solar Photovoltaic Converters and Concentrator Modules on Their Basis», Tech. Phys., v. 60, № 6, pp. 891-896, 2015, ISSN: 1063-7842.
- M.Z.Shvarts, E.D.Filimonov, S.A.Kozhukhovskaia, M.A.Mintairov, N.Kh.Timoshina, V.M.Andreev "Current Mismatch Violation in Concentrator Multijunction Solar Cells", Proceedings of the 13th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-13), 01-03 May 2017, Ottawa, Canada, AIP Conf. Proceedings, v.1881, 2017, pp. 040006, ISSN: 0094-243X, E-ISSN: 1551-7616.
- E.D.Filimonov, S.A.Levina and M.Z.Shvarts "Experimental Equipment for Optical Characterization of Fresnel Lens Concentrators", AIP Conf. Proceedings, v.2012, 2018, pp. 030005, ISSN: 0094-243X, E-ISSN: 1551-7616.

НОВЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРИБОР НАНОЛЮМИНОГРАФ

Базовое подразделение — лаборатория Физики прочности

Несколько лет тому назад инициативной группой ученых ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, Российского института радионавигации и точного времени (РИРВ) и фирмой PlasmaChem GmbH (Германия) был разработан, построен и запатентован в России [1] и в США [2] новый исследовательский прибор Нанолюминограф, позволяющий получать уникальную информацию о дефектной структуре и молекулярной динамике приповерхностных нанослоев твердых тел, которую нельзя получить ни одним другим методом. С его помощью можно также изучать химические реакции на поверхности твердых тел и взаимодействие вещества с различными активирующими источниками (низкотемпературной плазмой и пучками заряженных или нейтральных частиц).

Свойства поверхности твердых тел, как известно, существенно отличаются от свойств объема и во многом определяют его поведение в различных физических полях. Изучение поверхности твердых тел приобретает особенно важное значение в связи с интенсивным развитием физики наноразмерных объектов.

Работа прибора основана на использовании феномена термолюминесценции – свечении, возникающем при нагреве вещества, предварительно замороженного до температуры жидкого азота или гелия и подвергнутого воздействию ионизирующего излучения. Заряды, генерированные излучением, могут стабилизироваться в физических ловушках различной глубины. Нагрев, активизируя микроброуновское движение атомных групп и молекул, разрушает ловушки и освобождает пойманные заряды. Последние рекомбинируют с противоионами и испускают кванты света. Структурные ловушки разной глубины разрушаются при различной температуре, что делает зависимость интенсивности термолюминесценции от температуры (кривая свечения) немонотонной. По температурному положению максимумов интенсивности на кривой свечения можно судить о наличии дефектов и подвижности элементов структуры в исследуемых материалах.

Обычно для возбуждения термолюминесценции используют глубоко проникающие высокоэнергетические излучения, (рентгеновские или гамма-лучи). Такую люминесценцию называют «радиотермолюминесценция» (РТЛ) При работе с проникающими излучениями невозможно выделить сигнал от поверхности.



Рисунок 1. Схематическое изображение генерации свечения при РТЛ.

Поэтому, для исследования поверхности в конце 70-х годов прошлого века было предложено использовать в качестве ионизирующего источника маломощную низкотемпературную плазму тлеющего разряда (НТП), возбуждающую только поверхностный слой исследуемого материала, при нагреве которого испускаются кванты света. В отличие от РТЛ такую люминесценцию называют «плазмоиндуцированной термолюминесценцией» (ПИТЛ). Исследования с использованием НТП интенсивно велись многими исследовательскими группами (Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова и др.). Однако новый прибор в отличие от устройств, использующих РТЛ и ПИТЛ для анализа свойств материалов, имеет ряд принципиальных отличий и явных преимуществ.



Толщина активированного слоя зависит от приведенной напряженности электрического поля E/P, (где P - давление газа) и может варьировать от 5 нм до нескольких микрон

Рисунок 2. Схематическое изображение генерации свечения при ПИТЛ

К этим преимуществам относятся в первую очередь конструктивные особенности прибора, которые дают возможность менять способ активирования поверхности образца, не развакуумируя систему, поскольку и электронная пушка (бомбардировка электронами с энергией от 1 до 10 эв), и узел для генерации атомарного водорода (поток 10¹⁵частиц/см² сек) укреплены на фланцах в той же камере, в которой можно зажечь высокочастотный разряд в любом плазмообразующем газе (аргон, ксенон и др.).

Таким образом, можно надежно проводить сравнительный анализ воздействия на материал различных активирующих источников. Возможность одновременного или последовательного использования различных активирующих источников делает вновь созданный прибор многофункциональным измерительным прибором нового поколения и по его возможностям, и широте применения.

Кроме того, что очень важно, с целью предотвращения модификации структуры исследуемой поверхности в процессе ее активации время действия высокочастотного тлеющего разряда и его вкладываемая мощность уменьшены до минимально возможных величин, ограниченных чувствительностью детектирующей системы: (0,1-1) сек и 0.004±0,0001 Вт/см3, соответственно, что позволяет. При определенных напряженностях поля в плазме возбуждать люминесцентное свечение лишь в тончайших приповерхностных нанослоях толщиной не более 3-5нм. В то же время в обычных РТЛ устройствах вкладываемая мощность обычно на 1-2 порядка выше, а время активации поверхности образца исчисляется минутами и десятками минут, что неизбежно влечет за собой весьма существенное изменение поверхностной структуры, а также возможное образование чужеродной пленки на поверхности исследуемого образца.

Камера с образцом до охлаждения образца и его



возбуждения плазмой, атомарным водородом или электронами предварительно откачивается до вакуума 10-7 торр. Скорость линейного нагрева от 2 до 10 К/мин. Потребляемая мощность прибора менее 2 кВт. Температурный интервал от 77 до 400К. Детектирующее устройство — ФЭУ (300-600нм). Сигнал с ФЭУ через интерфейс поступает на ПК, который одновременно выполняет управляющие и регистрирующие функции по специально разработанной программе.

Анализ кривых свечения позволяет:

- Определять температуру и рассчитывать энергию активации релаксационных и фазовых переходов в поверхностных и приповерхностных слоях твердых тел.
- Рассчитывать размеры кинетических единиц движения, подвижность которых
- размораживается в регистрируемых релаксационных переходах в полимерных материал
- Изучать процессы деструкции полимеров
- Выявлять наличие электронных ловушек на поверхности твердого тела и оценивать их
- количество и глубину
- Получать интегральную характеристику дефектности поверхностного и приповерхностного слоя
- Анализировать длины волн света, излучаемого возбужденным поверхностным слоем исследуемого образца

- Оценивать слабосвязанные энергетические состояния поверхностного слоя и определять его химические свойства
- Исследовать взаимодействие ионизирующих излучений и потоков нейтральных или заряженных частиц с веществом
- Изучать протекание химических реакций на поверхности материалов

Нанолюминограф успешно работает в ФТИ в лаборатории Физики прочности в Отделении Физики твердого тела. По результатам, полученным с помощью метода термолюминесценции, в 2011 году Д.В. Лебедевым защищена кандидатская диссертация «Молекулярная подвижность в приповерхностных нанослоях полимеров». За последние 5 лет опубликовано 8 статей и большая обзорная статья в Advances in Materials Science Research. Результаты работ, проведенных с использованием Нанолюминографа, неоднократно докладывались на Российских и Международных конференциях. Подробнее об этих фундаментальных исследованиях с помощью метода термолюминесценции можно прочесть в разделе 3.4.9.

Публикации

- А.А. Калачев, Н.М. Блашенков, Ю.П. Иванов, А.Л. Мясников, Л.П. Мясникова, В.Л. Ковальский. Патент РФ № 2212650, 2003.
- Kalachev, A. A.; Blashenkov, N. M.; Ivanov, Yu. P.; Koval'skii, V. L.; Myasnikov,

СЕНСОРЫ И ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Базовое подразделение — лаборатория Физики редкоземельных полупроводников.

Физика редкоземельных полупроводников (РЗП), сформировавшаяся к настоящему времени как отдельное направление, изучает разнообразные и специфичные свойства редкоземельных соединений. Редкоземельные полупроводниковые материалы выделяются среди других групп полупроводников наличием некоторых ярко выраженных эффектов и рекордных электрических параметров. Сюда можно отнести минимальное давление всестороннего сжатия для возникновения фазового перехода полупроводник-металл, наличие фазового перехода полупроводник-металл при одноосном сжатии образца и при полировке его поверхности, максимальную величину тензорезистивного эффекта, максимальную величину термовольтаического эффекта, наибольшую чувствительность электросопротивления тонких плёнок к молекулам осаждённого на их поверхности газа. Некоторые из этих свойств находят практическое применение при создании первичных полупроводниковых преобразователей с рекордными эксплуатационными параметрами.

Родоначальником данного направления был А. Ф. Иоффе, под руководством которого исследования редкоземельных полупроводников были начаты в 1960 году. Впоследствии эти работы были продолжены В. П. Жузе и И.А. Смирновым. В этот период происходило накапливание данных о физических свойствах РЗП. В настоящее время дальнейшие исследования свойств РЗП и разработка полупроводниковых приборов на их основе ведутся под руководством В.В. Каминского.

Уникальность свойств редкоземельных полупроводниковых материалов связана прежде всего с электронной структурой самого редкоземельного атома. В периодической таблице Д.И. Менделеева редкоземельные элементы называются лантаноиды. С лантана начинается заполнение новой электронной оболочки, 4f, от 0 у La до 14 электронов у Lu. Это максимально возможное количество электронов на одной оболочке. По законам квантовой физики эти электроны пространственно расположены близко к ядру (r~0.3 Å) и, тем самым, экранируют его влияние на внешние электроны. Очевидно, вследствие этого третий ионизационный потенциал у этих элементов минимален. Именно это определяет уникальность свойств РЗП.

При образовании соединений f – оболочки не перекрываются друг с другом, а образуют локализованные уровни с концентрацией ~10²²см⁻³. По энергии эти уровни могут попасть в запрещённую зону полупроводника и выступать уже в качестве донорных. Этот факт является уникальным, т.к. в стандартных полупроводниках не удаётся создать такую огромную концентрацию локальных примесных уровней, и именно он играет определяющую роль в кинетических явлениях, оптике, становится ответственным за появление различных фазовых переходов.

Редкоземельный полупроводниковый материал моносульфид самария (SmS) - является наиболее хорошо изученным среди РЗП, поскольку обладает рядом свойств, выделяющих его не только среди редкоземельных полупроводников, но и среди полупроводниковых материалов вообще. В этом полупроводнике 4f-уровни иона самария локализованы в запрещенной зоне наиболее близко к дну зоны проводимости (~ 0.2 эВ) по сравнению с другими РЗП. Кроме того, все обнаруженные в SmS эффекты связаны с возможностью иона Sm легко изменять валентность (Sm²⁺↔ Sm³⁺+e) под действием давления и температуры в силу электронной конфигурации самого атома самария. Эти свойства были использованы для инновационного развития полупроводниковой технологии и техники. Таким образом, в Институте были обнаружены



Рисунок 1. Мембрана датчика давления на сульфиде самария в авиационном двигателе.

и применены на практике следующие свойства SmS и материалов на его основе:

1) Тензорезистивный эффект, отличающийся максимальной среди полупроводниковых материалов величиной коэффициента тензочувствительности (до 260 при Т=300 К), линейностью изменения электросопротивления по давлению, деформации и температуре. Тензочувствительные материалы на основе сульфида самария превосходят по своим эксплуатационным параметрам все остальные. Их отличает максимальная чувствительность, минимальный температурный коэффициент сопротивления, максимальная линейность характеристик, самая высокая среди полупроводников радиационная стойкость, высокая технологичность при производстве тонкоплёночных структур. На сульфиде самария создано новое поколение тензорезисторных датчиков всевозможных механических величин. Разработки защищены 20 российскими и зарубежными авторскими свидетельствами и патентами. Технология производства тензорезисторных датчиков на сульфиде самария передана в промышленность. На рис. 1 представлена мембрана датчика давления с тензорезисторами на основе SmS для авиационного двигателя.

2) Эффект изменения примесной проводимости в результате адсорбции газов на поверхности тонкоплёночных резисторов из SmS. На рис. 2 представлен изготовленный в Институте образец датчика резистивного типа концентрации кислорода и метана, превосходящий по своим параметрам существующие аналогичные полупроводниковые датчики. Значения минимально обнаруживаемых концентраций ~ 0.01мг м³, против 0.1+10 мг/м³ у лучших аналогов (полупроводниковый датчик на ZnO). Диапазон измеряемых концентраций — 8 порядков против 5-6 порядков у датчика на ZnO. Помимо этого датчик на основе РЗП позволяет детектировать различные газы путём изменения его рабочей температуры.



Рисунок 2. Датчик концентрации газов (метан, кислород) в атмосфере.

3) Термовольтаический эффект, который заключается в том, что при наличии градиента примеси по объёму образца SmS при нагревании элемента до температуры около 180 °С в направлении градиента примеси возникает электрическое напряжение при постоянной температуре. Этот эффект был использован для преобразования тепловой энергии в электрическую. В Институте были изготовлены макетные образцы преобразователей с КПД преобразования до 36%. На рис. 3 представлен рабочий элемент термовольтаического преобразователя. Удельная генерируемая мощность такого преобразователя — 1.8 Вт./г против 0.2 Вт/г, а напряжение генерируемое единичным элементом — 5В против 70 мВ у классических термоэлементов. Радиационная стойкость в 10 раз выше, чем у классического термоэлемента.



Рисунок 3. Преобразователь тепловой энергии в электрическую на основе термовольтаического эффекта в SmS.

ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ПОДЛОЖКАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Базовое подразделение — лаборатория Квантовой электроники, при участии сотрудников лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур.

Интегрально-оптические модуляторы являются ключевыми элементами современных оптико-информационных систем. Особый интерес к развитию технологий интегральнооптических модуляторов связан со стремительным развитием волоконно-оптических систем телекоммуникаций и радиофотоники. ФТИ им. А. Ф. Иоффе является одним из ведущих научных центров развивающих технологию интегрально-оптических модуляторов на подложках ниобата лития.

Исследования в области применения нелинейных оптических материалов для оптической обработки сигналов ведутся в лаборатории Квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе начиная с 70-х годов прошлого века. Всемирно признаны возглавляемые проф. М.П. Петровым пионерские работы в области фоторефрактивных материалов и пространственных модуляторов света. На рубеже 1990-х — 2000-х годов значительный прогресс в области оптических телекоммуникаций обуславливает возникший интерес к технологиям создания широкополосных интегрально-оптических модуляторов. Как раз в это время группа под руководством А.В.Шамрая (ныне заведующего лабораторией Квантовой электроники) начинает развивать направление интегральной оптики на подложках ниобата лития.





Магнетронное напыление



Высокотемпературный отжиг



Векторный анализатор с зондовым вводом



Алмазная резка



Полировка



Стыковка с оптическим волокном и сборка в корпус



Рисунок 1. Технологический цикл разработки и исследований интегрально-оптических модуляторов

Несмотря на то, что модуляторы на основе ниобата лития появились на рынке высокоскоростной волоконно-оптической связи в начале 1990-х, данная технология не утратила своих лидирующих позиций и является основной в новейших волоконно-оптических линиях связи на основе фазовой модуляции с когерентным приёмом (QPSK) и на рынке аналоговых применений, таких как системы радиофотоники и высокоточные оптические датчики. Исследования, направленные на совершенствование данной технологии и улучшения характеристик модуляторов на её основе активно ведутся во всем мире. В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе реализован полный цикл от концептуальной разработки нового типа модуляторов до изготовления экспериментальных образцов и проведения полного тестирования их характеристик.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе является единственным в России местом где реализованы обе промышленные технологии изготовления оптических волноводов на подложках ниобата лития: термическая диффузия титана [1] и низкотемпературный протонный обмен с последующим отжигом [2], причем на двух базовых кристаллических ориентациях (Х – и Z – срез).



Рисунок 2. Характеристики оптических волноводов на подложках ниобата лития



Рисунок 3. Модулятор на основе управляемой брэгговской решетки: внешний вид и демонстрация управления спектральной характеристикой.

Технология позволяет изготавливать волноводы высокого оптического качества с характеристиками, соответствующими лучшим мировым аналогам, с удельные оптическими потерями на уровне 0,1 дБ/см и хорошим согласованием с одномодовым телекоммуникационным волокном, что обеспечивает низкие оптические потери модуляторов до 1,5 дБ из волокна в волокно для лучших образцов.

В лаборатории Квантовой электроники были разработаны различные типы интегрально-оптических модуляторов осуществляющих управление всеми характеристиками оптического излучения: амплитудой, фазой, поляризацией. Была предложена оригинальная техника электрооптического управления интегрально-оптическими брэгговскими решетками [3, 4], позволяющая реализовать как перестройку центральной длины волны, так и гибкое управление формой оптической спектральной характеристики пропускания (отражения). Модуляторы на основе управляемых фоторефрактивных брэгговских решеток в волноводах на подложках ниобата лития представляют большой интерес для создания новых форматов модуляции и мультиплексирования оптических каналов [5].

ФТИ им. А.Ф. Иоффе первым в России начал разрабатывать высокочастотные интегрально-оптические модуляторы [6]. Стратегическая важность данного



Рисунок 4. Экспериментальный образец амплитудного интегрально-оптического модулятора с полосой частот 18 ГГц.

направления обусловлена значительными ограничениями на поставку в Россию импортных компонентов СВЧ оптоэлектроники. К настоящему времени достигнут уровень полосы частот модулирующего сигнала 18 ГГц, что уже отвечает современным требованиям систем телекоммуникаций и радиофотоники, на рынок которых нацелена данная разработка. Дальнейшие исследования в данной области направлены на расширение полосы частот модуляции до 40 ГГц и выше, а также на снижение управляющего напряжения до уровня менее 3 В.

Новые области применения интегрально-оптических модуляторов выдвигают беспрецедентно высокие требования к их характеристикам. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработана уникальная аддитивная технология интерактивной балансировки интегрально-оптического интерферометра Маха-Цандера [7], которая позволила увеличить контраст модуляции амплитудного модулятора до уровня более 50 дБ. В технологии для подстройки характеристик уже изготовленного интегрально-оптического чипа используется локальная засветка при помощи волоконно-оптического зонда. Модуляторы с высоким контрастом модуляции представляют большой интерес для квантовых оптических систем передачи и обработки сигналов [8], а также для систем опроса распределенных волоконно-оптических датчиков, где высокий контраст модуляции обеспечивает минимальный уровень шума.



Рисунок 5. Демонстрация повышения контраста модуляции интегральнооптического модулятора Маха-Цандера при локальной засветки подложки ниобата лития с помощью волоконно-оптического зонда.

Публикации

- Караваев П.М., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Тронев А.В., Шамрай А.В. Выделение поляризации в титандиффузных волноводах на подложках ниобата лития // Письма ЖТФ — 2016 — т. 42, №10 — С. 33-39.
- Ильичев И.В., Козлов А.С., Гаенко П.В., Шамрай А.В. Оптимизация технологии изготовления канальных протонообменных волноводов в кристаллах ниобата лития // Квантовая электроника — 2009 — т. 39 № 1 — С.98-104.
- Петров М.П., Шамрай А.В., Ильичев И.В., Козлов А.С. Оптический элемент и способ управления его спектральной характеристикой, система оптических элементов и способ управления системой. Патент РФ № 2248022.
- Шамрай А.В., Ильичев И.В., Козлов А.С., Петров М.П. Новый метод управления формой спектральной характеристики Брэгговских решеток в электрооптических материалах // Квантовая электроника — 2005 – т. 35 — С.734-740.

- Лебедев В.В., Ануфриев К.М., Тогузов Н.В., Ильичев И.В., Шамрай А.В. Дополнительный информационный канал передачи частотно-модулированных сигналов в стандартных волоконно-оптических линиях связи на основе амплитудной модуляции // Письма ЖТФ — 2015 — т.41, № 22 — С. 32-39.
- Лебедев В.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В. Влияние материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов // Письма ЖТФ — 2014 –т.40, № 17 — С. 39-46.
- Тронев А.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М, Парфенов М.В., Шамрай А.В.: Способ подстройки коэффициента деления волноводного разветвителя на подложке ниобата лития. Патент РФ № 2646546.
- Tronev A.V., Parfenov M., Agruzov P.M., llichev I.V., Shamray A.V. High extinction ratio integrated optical modulator for quantum telecommunication systems // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018 — Vol. 951, N 1 — ArtNo: # 012002.

КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА

Базовое подразделение — лаборатория Неравновесных процессов в полупроводниках.

Полупроводниковые детекторы ядерных излучений являются одним из важнейших инструментов экспериментальной физики высоких энергий, ядерной физики, астрофизики. В настоящее время их востребованность растет за счет таких областей как науки о жизни, экология и медицина. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся исследования и работы по созданию кремниевых детекторов частиц высоких энергий для ряда международных экспериментов, проводящихся, в том числе, и на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в ЦЕРНе.

Большой Адронный Коллайдер (БАК) - это крупнейший и наиболее совершенный инструмент, созданный человечеством для исследования мироздания и истории Вселенной. Новый уровень энергий укоренных ионов (до 14 ТэВ), в 70 раз превышавший достигнутый к тому времени предел на его предшественнике - ускорителе LEP в ЦЕРНе, высокая интенсивность пучков и требуемая микронная точность прослеживания траекторий частиц, возникающих в ходе взаимодействия протонов высоких энергий, требовали новой инструментальной базы экспериментов. Удовлетворить этим условиям было возможно только с использованием кремниевых планарных детекторов с сегментированными P-N переходами, имеющих топологию стриповых и пиксельных матриц. При этом суммарная площадь таких детекторов измеряется десятками квадратных метров при количестве детектирующих независимых сегментов до 107 штук, а детекторы подвергаются воздействиям самих детектируемых частиц и интенсивного фонового излучения. Проблема радиационной деградации оказалась сложной и мультидисциплинарной, что стимулировало создание в 1997 г. коллаборации исследователей, именуемой с 2002 г. «ЦЕРН-RD50», в которую вошло около 60ти институтов из 22-х стран мира, в том числе ФТИ, приглашенный как эксперт в области физики полупроводников и полупроводниковых детекторов ядерных излучений. Важнейшей задачей коллаборации является разработка сценария деградации кремниевых





детекторов в ходе долговременных экспериментов на БАК. В качестве примера на рисунке 1 приведены данные расчета трансформации электрического поля при облучении кремниевых детекторов согласно модели ФТИ и результат ее применения для обработки экспериментальных данных по деградации сигнала при облучении детектора релятивистскими протонами [1].

По инициативе ФТИ в ЦЕРНе был создан стенд для исследования транспорта носителей заряда. Установка позволила получить информацию по дозовым зависимостям позиционного разрешения детекторов внутреннего трекера эксперимента ATLAS [2].

Значительное место в работах ФТИ занимают разработки новых типов кремниевых детекторов частиц высоких энергий. Эти работы явились естественным результатом физических исследований по проблеме радиационной деградации кремниевых детекторов, мотивированных текущими экспериментами на БАК и перспективными задачами физики высоких энергий.



Рисунок 2. Зависимости амплитуды сигналов от напряжения при регистрации протонов с энергией 27 ГэВ в обычном кремниевом детекторе (треугольники) и детекторе с инжекцией (точки), оба облученных нейтронами с энергией 1 МэВ и дозой 1х10¹⁵ см⁻².

ФТИ предложил принцип и создал новый тип детекторов — детекторы с инжекцией тока ("Current Injected Detectors") [3], в которых используется эффект тока,



Рисунок 3. Дозовые зависимости сигналов при регистрации протонов с энергией 27 ГэВ в обычном кремниевом детекторе (синяя кривая) и детекторе с инжекцией (красная).

ограниченного пространственным зарядом в полупроводниках, компенсированных глубокими энергетическими уровнями. Инжекция позволяет стабилизировать распределение электрического поля в чувствительном объеме детектора и уменьшить концентрацию уровней, способных захватывать неравновесные носители заряда. Оба фактора снижают темп радиационной деградации. Изготовленные детекторы были испытаны совместно с Институтом физики г. Хельсинки на ускорителях в ЦЕРНе и лаборатории Ферми (США), показав ожидаемые характеристики (Рис. 2, 3).

Была осуществлена разработка так называемых "edgeless" детекторов – детекторов с минимизированной нечувствительной зоной на периферии. Работа была выполнена в целях эксперимента TOTEM, задачей которого являлось изучение малоуглового рассеяния протонов с энергией 7-8 ТэВ. Эксперимент требовал создания уникальной системы регистрации протонов, обеспечивающей измерение их траекторий на расстоянии в несколько десятков микрон от пучка с точностью на уровне 5 мкм. ФТИ была предложена



Рисунок 4. Фотография *edgeless* детектора (слева) и детектирующий модуль с *edgeless* детекторами эксперимента *TOTEM* (центр) и поле рассеяния протонов в БАК (справа).

уникальная система стабилизации статических характеристик детекторов, позволившая уменьшить ширину нечувствительной области на их периферии более чем в 20 раз, т.е. до десятков микрон, что стало решающим фактором в реализации эксперимента. Важно, что вся разработка, начиная от физической концепции, до технологического решения была выполнена в России и закончена изготовлением на технологической базе НИИ Материаловедения (г. Зеленоград) полной партии в 400 детекторов, инсталлированных в эксперимент ТОТЕМ. Значимость разработки была отмечена в статьях журнала CERN Courier с фотографиями частей детектирующего модуля на его обложках [4].

Еще одним проектом, выполненным ФТИ в целях развития БАК, является создание прототипов криогенных мониторов потерь частиц из пучка коллайдера. Проблема состоит в том, что случайное рассеяние протонов пучка на молекулах остаточного газа и инородных частицах в ионопроводе ускорителя вызывает потоки вторичных частиц высоких энергий, нагревающих сверхпроводящие обмотки магнитов ускорителя. Результатом локального нагрева может стать нарушение сверхпроводимости обмоток и последующее термическое и механическое разрушение, катастрофическое для ускорителя. Проблема может быть решена мониторированием интенсивности радиационного поля непосредственно в области обмоток магнитов, находящихся в сосуде со сверхтекучим гелием при температуре 1.9 К. Столь экзотический температурный режим работы кремниевых детекторов в совокупности с высокой радиационной нагрузкой явились новым вызовом для детекторной науки и техники. Вопрос разработки таких детекторов был поставлен перед ФТИ-и-в 2011г. Институтом были начаты исследования в этом направлении на базе криогенной лаборатории ЦЕРНа. Уже первые эксперименты по исследованию радиационных воздействий на кремниевые детекторы при температуре 1.9 К показали, что скорость деградации


Рисунок 5. Монитор потерь частиц пучка, установленный на торце сосуда охлаждения магнита БАК, (слева) и дозовая зависимость чувствительности детекторов монитора (справа)

чувствительности кремниевых детекторов в этих условиях до 10 раз выше, чем при комнатных температурах. Исследования позволили оптимизировать структуру детекторов и тем самым получить предсказуемую дозовую характеристику их чувствительности. Пробная партия мониторов была изготовлена в России (рис. 5) и поставлена в ЦЕРН для испытаний на БАК в ходе его модернизации [5].

Поскольку сложность экспериментов в физике высоких энергий повышается, что неизбежно приводит к необходимости создания новых типов детекторов и совершенствованию уже существующих, важное место занимает вопрос технологического обеспечения разработок. В этой части расширяется сотрудничество с институтами микроэлектронной промышленности и отделениями института, имеющими уникальные технологии. Важным направлением работ является развитие электроники, позволяющей оптимально адаптировать детекторы к современным устройствам регистрации сигналов и создавать полнофункциональные устройства. Это направление развивается с ОИЯИ (г. Дубна), в частности, в связи с созданием на его площадке новых установок и проведением новых экспериментов.

Публикации

- V. Eremin, E.Verbitskaya, A.Zabrodskii, Z.Li, J.Harkonen. "Avalanche effect in Si heavily irradiated detectors: Physical model and perspectives for application". Nucl. Instr. and Meth. 658 (2011) 145–151
- E. Verbitskaya, V. Eremin, G. Ruggiero, S. Roe, et al. "Effect of SiO2 Passivating Layer in Segmented Silicon Planar Detectors on the Detector Response" IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 5, p. 1877, Oct. 2005
- J. Haerkonen, V.Eremin, et al. "Test beam results of a heavily irradiated Current Injected Detector (CID)". Nucl. Instr. and Meth. A 612 (2010) 488–492
- E. Verbitskaya, V. Eremin, G. Ruggiero. "Status of silicon edgeless detector developments for close-to-beam experiments". Nucl. Instr. and Meth. A 612 (2010) 501–508.
- E. Verbitskaya, V. Eremin, A. Zabrodskii. "Development of silicon detectors for Beam Loss Monitoring at HL-LHC". 2017 JINST 12 C03036.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Базовое подразделение — лаборатория Квантовой электроники, при участии сотрудников лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур.

Использование оптических методов для высокоточных измерений обеспечивает беспрецедентно высокую чувствительность. Ярким примером может служить проект LIGO, позволивший впервые экспериментально наблюдать гравитационные волны. Использование интегральной оптики потенциально дает возможность значительно снизить габариты и стоимость таких систем, сохраняя высокую чувствительность и функциональность, превращая их из уникальных установок в широко распространенные технические средства. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе ведутся разработки новых интегрально-оптических устройств для высокоточных оптических измерений.

С момента экспериментов Майкельсона и Морли по измерению скорости света оптические интерференционные системы измерений зарекомендовали себя как системы, обладающие беспрецедентно высокой чувствительностью. Одно из последних мировых достижений экспериментальной физики — наблюдение гравитационных волн, стало возможно благодаря уникальным оптическим интерферометрам проекта LIGO. Использование волоконной и интегральной оптики позволяет применить методы оптической интерферометрии в виде малогабаритных, надежных, способных работать в сложных внешних условиях устройств, и делает их доступными для широкого круга практических применений.

Повышение чувствительности оптических систем измерений напрямую связано с понижением уровня шумов. Развитие в данной области идёт по двум основным направлениям, разработка методов обработки оптических сигналов с использованием активной стабилизации оптических интерферометров и повышение когерентности (снижение собственных шумов) оптического излучения. Интегральная оптика дает решения для обоих направлений.

Примером высокоточного интерференционного оптического датчика с системой обработки сигналов на основе интегральной оптики является волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности. где использование в качестве ключевого элемента системы обратной связи многофункциональной интегрально-оптической схемы позволяет достичь относительной чувствительности на уровне 10-14. В лаборатории Квантовой электроники ФТИ была разработана оригинальная конфигурация многофункциональной интегрально-оптической схемы на основе титано-диффузных оптических волноводов на подложках ниобата лития [1]. Данный вид схемы успешно используется АО «Концерн «ЦННИ «Электроприбор» в серийно выпускаемых волоконно-оптических гироскопах с дрейфом нулевого сигнала менее 0,01 град/час. В настоящее время ведутся работы по дальнейшему совершенствованию технологии многофункциональных интегрально-оптических схем, направленные на создание волоконно-оптических гироскопов с дрейфом нулевого сигнала менее 0,001 град/час [2].

Помимо схем для гироскопов в Институте разрабатывается целая линейка интегрально оптических устройств для волоконно-оптических датчиков, таких как, амплитудный модулятор с высоким контрастом модуляции более 50 дБ [3], преобразователь частоты оптической несущей со сдвигом 150 — 200 МГц, управляемый модулятор поляризации с поляризационной экстинкцией более 40 дБ [4].

Использование квантовых методов в интерференционных датчиках позволяет вывести их на принципиально новый уровень и преодолеть фундаментальный предел квантовых шумов. Разрабатываемые в Институте интегрально-оптические схемы на основе волноводов в кристаллических подложках ниобата лития потенциально могут стать ключевыми элементами оптических систем квантовой обработки информации [5]. Уникальные свойства ниобата лития позволяют реализовывать большинство функциональных элементов квантовой фотоники на одной подложке. Эффективная генерация квантовых состояний света может быть реализована с использованием нелинейных эффектов в структурах с инверсией сегнетоэлектрических доменов. Волноводные интерферометры и модуляторы позволяют реализовывать линейно-оптические квантовые вычисления. Легирование ионами редкоземельных металлов может быть использовано для квантовой памяти. Использование интегрально-оптической конфигурации потенциально позволит значительно



Рис. 1. Многофункциональная интегрально-оптическая схема в составе волоконно-оптического гироскопа, серийно выпускаемого АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Электронный блок обработки сигналов

Сигна



Рис. 2. Нано-размерная структура сверхпроводящего детектора единичных фотонов на поверхности оптического волновода. Проект реализуется совместно с лаб. спектроскопии поверхности полупроводников ИФТТ РАН.

повысить эффективность детекторов единичных фотонов за счет увеличения длины взаимодействия. Работа в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1500 — 1600 нм) делает данную платформу особенно интересной с точки зрения практических применений.

Интегрально-оптические элементы используются также как малогабаритные, монолитные твердотельные чувствительные элементы. Примером такого применения является полностью диэлектрический интегрально-оптический датчик напряжения, разрабатываемый в ФТИ им. А.Ф. Иоффе совместно с СПбПУ Петра Великого [6]. Областями применения разрабатываемого датчика являются, прежде всего, системы учета электроэнергии и мониторинга электросетей. Отсутствие насыщения, гистерезиса, остаточных необратимых изменений параметров после перегрузки, широкая полоса пропускания и расширенный динамический диапазон позволяет точно воспроизводить сигналы сложной формы, возникающие, например, при коротких замыканиях, предоставляя реальные значения переменных и постоянных составляющих первичного тока и напряжения. Среди эксплуатационных преимуществ также отметим повышенную безопасность, благодаря высокой термической и электродинамической стойкости, полную гальваническую развязку вторичных цепей, невосприимчивость к электромагнитным помехам, уменьшенные габариты и вес. Другой перспективной областью применения интегрально-оптических датчиков с полностью диэлектрическим чувствительным элементом являются системы тестирования антенных решеток в ближней зоне. Электрооптический принцип работы интегрально-оптического элемента обеспечивает требуемый для данного применения высокочастотный отклик (вплоть до 100 ГГц). Полностью диэлектрический миниатюрный чувствительный элемент вносит минимальные искажения в распределение измеряемого электрического поля, чем обеспечивается высокая точность измерений. Особое значение при измерении на высоких частотах имеет полная гальваническая развязка, защищающая высокочувствительные приемные цепи и невосприимчивость к электромагнитным помехам.



Рис. 3. Полностью диэлектрические чувствительные элементы интегрально-оптического датчика электрического поля (напряжения).

Разрабатываемые в ФТИ им. А.Ф. Иоффе технологии интегрально-оптических схем для волоконно-оптических датчиков позволяют вывести оптические методы измерений на новый уровень, сделать измерительные комплексы более компактными и надёжными, сохраняя высокие требования к чувствительности и скорости измерений, диктуемые современными практическими применениями.

Публикации

- Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В. Интегрально-оптический модулятор для волоконнооптического гироскопа. Патент РФ № 166908.
- Варламов А.В., Плотников М.Ю., Алейник А.С., Агрузов П.М., Ильичев И.В., Шамрай А.В. Акустические колебания в интегральных электрооптических модуляторах на основе ниобата лития // Письма ЖТФ — 2017 — т.43, № 21 — С. 87-94.
- Петров А.Н., Тронев А.В., Агрузов П.М., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Величко Е.Н., Шамрай А.В. Использование внешнего интегрально-оптического модулятора для формирования оптических импульсов с предельно высоким коэффициентом экстинкции // Фотон-экспресс — 2015 — т.6, №126 — С. 192-193.
- Агрузов П.М., Ильичев И.В., Караваев П.М., Тогузов Н.В., Шамрай А.В. Интегрально-оптический элемент. Патент РФ № 2594987.
- Tronev A.V., Parfenov M., Agruzov P.M., Ilichev I.V., Shamray A.V. High extinction ratio integrated optical modulator for quantum telecommunication systems // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018 — Vol. 951, N 1 — ArtNo: # 012002.
- Петров В.М., Лиокумович Л.Б., Медведев А.В., Шамрай А.В., Лебедев В.В. «Интегрально-оптический сенсор для бесконтактных измерителей напряжённости электрического поля» // Сборник докладов 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» — 2012 — С. 327-332.

ПОРТАТИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В НЕФТИ НА ОСНОВЕ ОПТОПАРЫ «СВЕТОДИОДНАЯ МАТРИЦА – ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ФОТОДИОД» СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА (1.6 – 2.4 µm)

Базовое подразделение — лаборатория Инфракрасной оптоэлектроники

Впервые предложен оптический метод измерения содержания воды в нефти на базе свето – и фотодиодов средней ИК-области спектра (1.6-2.4 µm), создан опытный образец портативного анализатора на его основе, позволяющий проводить измерения в оперативном режиме непосредственно на нефтяной скважине. Разработана конструкция трехэлементной светодиодной матрицы с максимумами излучения на длинах волн 1.65 µm (максимум поглощения нефти), 1.94 µm (максимум поглощения воды), и 2.20 µm (опорный сигнал) и возможностью температурной стабилизации. Для определения оптимальных максимумов излучения с использованием светодиодов исследованы спектры поглощения чистой воды, необводненной нефти и водо-нефтяных эмульсий с разным содержанием воды.

Определение концентрации воды в водо-нефтяной эмульсии имеет большой практический интерес. На данный момент не существует портативного прибора для проведения экспресс-анализа содержания воды в сырой нефти непосредственно на скважинах и на участках первичной переработки нефти. Применяемые методы основаны на гравитационном отстаивании, центрифугировании, тепловой и холодовой обработках, микроволновой и ультразвуковой сепарации, сепарации под воздействием постоянного электрического поля. Перечисленные методы измерения содержания воды в нефти трудоемки, предполагают использование громоздкого оборудования, требуют много времени, поэтому не позволяют проводить измерения в оперативном режиме.

В ИК оптическом диапазоне, как известно, находятся характеристические линии поглощения многих химических веществ, в том числе воды и углеводородов. В Институте был разработан метод измерения содержания воды в нефти, основанный на спектральном анализе оптического поглощения водо-нефтяной смеси. В качестве источников и приемников излучения были выбраны свето – и фотодиоды, созданные в Институте совместно с ООО «АИБИ» на основе гетероструктур в системе GaSb-InAs, перекрывающие спектральный диапазон 1.6-5.0 µm [1].

Разработка методики измерения поглощения воды и нефти с помощью светодиодов, излучающих в диапазоне 1.6 — 2.3 µm

Принцип оптической спектроскопии основан на селективном поглощении энергии излучения молекулами вещества. Спектр вещества в среднем ИК-диапазоне представляет собой ряд полос поглощения, отвечающих разным колебательным энергетическим переходам в молекулярной системе. Как известно, вода и углеводороды имеют полосы поглощения в диапазоне 1.5-4.0 µm. При создании анализатора воды в водо-нефтяной смеси использовались полосы поглощения воды 1.86-1.94 µm и поглощения нефти в области 1.60-1.80 µm, перекрываемые разработанными свето – и фотодиодами.

Для анализа спектров поглощения воды и нефти было использовано 9 типов светодиодов, излучающих в диапазоне 1.6–2.4 µm, с максимумами интенсивности на длинах волн 1.6µm (LED16), 1.7µm (LED17), 1.8µm (LED18), 1.9µm (LED19), 2.0µm (LED20), 2.1µm (LED21), 2.2µm (LED22), 2.3µm (LED23) и 2.4µm (LED24). Вода поглощает излучение светодиодов в области 1.85-2.05 µm, 2.4-2.6 µm, нефть — в диапазонах 1.65-1.87 µm и 2.24-2.47 µm (рисунок 1).



Рисунок 1. Пропускание ИК-излучения водой (а), пропускание ИК-излучения нефтью (б)

Для одновременного детектирования и воды, и нефти необходимо подобрать два измерительных светодиода таким образом, чтобы излучение одного из них максимально поглощалось водой, другого — нефтью. При этом на поглощение излучения светодиода, детектирующего воду, нефть должна оказывать минимальное влияние и наоборот: вода не должна сильно влиять на поглощение излучения, детектирующего нефть. Исходя их таких соображений, для детектирования нефти можно использовать светодиоды с максимумами излучения в диапазоне 1.67-1.87 μm, для детектирования воды — в диапазоне 1.85-2.05 μm.

Оптическая ячейка портативного анализатора воды в нефти

Объект анализа, водонефтяная эмульсия, имеет сложную негомогенную структуру. Вода в нефти находится, как правило, в эмульгированном состоянии, в виде капель разного размера. Такая смесь называется «обратной» эмульсией («вода в масле») с непрерывной фазой в виде нефти, в которой распределены капли воды. С увеличением содержания воды (от 35 до 70%) происходит обращение эмульсии, она становится «прямой» («масло в воде»), непрерывной фазой смеси в этом случае является вода. Водо-нефтяные эмульсии с разным содержанием воды пропускают излучение по-разному, при этом большое влияние оказывает не только поглощение нефти и воды, но и рассеивание на границах раздела фаз нефть-вода.

Для анализа водо-нефтяной эмульсии была разработана трехканальная схема измерений с использованием в качестве излучателей трех светодиодных чипов. Один излучатель (измерительный) обеспечивает детектирование воды (сигнал максимально поглощается водой), второй (измерительный) — детектирование нефти (сигнал максимально поглощается нефтью), третий является опорным, максимум его излучения находится в области прозрачности воды и нефти. Математическая обработка трех сигналов позволяет, прежде всего, определять поглощение воды и нефти, а также скомпенсировать влияние рассеивания на границах фаз нефть-вода, а также других факторов, не связанных с поглощением воды и нефти.

В соответствии с рисунком 1, в области поглощения воды 1.85-2.05 µm максимально поглощается излучение светодиода с максимумом на длине волны 1.94 µm (LED19). Для детектирования нефти использован светодиод с максимумом излучения 1.65 µm (LED16). В качестве опорного сигнала применён светодиод с максимумом на длине волны 2.20 µm (LED22), излучение которого достаточно слабо поглощается и водой, и нефтью. Для регистрации сигналов от трех светодиодов использован фотодиод PD24 с широким диапазоном чувствительности 1.0-2.4 µm. Основные параметры светодиодов LED16, LED19, LED22 и фотодиода PD24 [2] представлены в таблице 1.

	Таблица 1. Основные параметры светодиодов LED16, LED19, LED22 и фотодиода PD24		
	Длина волны в	Ширина спектра на	Мощность в квази-непрерывном
	максимуме излучения,	полувысоте,	режиме
	μm	nm	при I=200mA, mW
LED16	1.65	110	0.9
LED19	1.94	120	1.2
LED22	2.20	190	1.1
	Граничная длина волны, μm	Чувствительность, А/W	Обнаружительная способность, cm.Hz1/2/W
PD24	2.4	0.9-1.1	(3-8).1010

Оптическая мощность и спектр излучения светодиодов, а также чувствительность фотоприемника сильно зависят от температуры, поэтому в конструкциях излучателя и приемника предусмотрен миниатюрный термохолодильник, позволяющий стабилизировать температуру в диапазоне – 10– +50°C. Три светодиодных чипа на керамике смонтированы в едином корпусе с термохолодильником, при такой конфигурации обеспечиваются одинаковые условия работы трех светодиодных каналов (рисунок 2).

Оптическая ячейка анализатора реализована в виде, представленном на рисунке 3а. Вертикальное





расположение оптопары и горизонтальное расположение кюветы с водо-нефтяной смесью являются предпочтительными, поскольку в этом случае не происходит гравитационное расслаивание смеси. Фотоприемник и трехэлементная светодиодная матрица смонтированы на стандартных корпусах ТО-5. Для сужения диаграммы направленности излучения и защиты от механических повреждений к корпусам привариваются параболические рефлекторы с кварцевыми стеклами. Между светодиодной матрицей и фотоприемником помещается кювета с измеряемой пробой. Толщина слоя, через который проходит излучение, составляет 0.1-0.5 mm. Широкополосный фотодиод PD24 позволяет детектировать излучение двух измерительных сигналов (LED16, LED19) и опорного сигнала (LED22) (рисунок 3б).

Была построена калибровочная кривая, которая представляет собой зависимость концентрации от значения приведенного сигнала, полученного обработкой трех сигналов фотодиода. Кривая была определена для нефти типа «девон» (Бирючевский ЦПС ОАО «ТАТНЕФТЬ», г. Бугульма) в диапазоне концентраций воды в смеси от 0 до 80%. На калибровочной кривой можно выделить два участка: в диапазоне концентраций воды от 0 до ~40% и от ~40 до 80%. Это связано с существованием двух различных типов эмульсий на этих участках — «обратной» и «прямой», — которые характеризуются разными оптическими свойствами и по-разному рассеивают проходящее излучение.



Рисунок 3 – конструкция оптической ячейки (а), спектры излучения светодиодов LED16, LED19, LED22 и спектральная чувствительность фотодиода PD24 (б)

Портативный анализатор воды в нефти

В состав созданного анализатора воды в нефти входит оптический блок (оптическая ячейка), основным элементом которой является оптопара «трехэлементная матрица – фотодиод», а также электронный блок управления и обработки результатов измерений с микропроцессором (рисунок 4).

Электронный блок анализатора обеспечивает независимое управление тремя светодиодными каналами,



Рисунок 4. Схема портативного анализатора воды в нефти

синхронное усиление сигнала фотодиода, управление и стабилизацию температуры светодиодов и фотодиода. В микропроцессоре производится математическая обработка сигналов от трех каналов и определяется значение концентрации воды по калибровочной кривой, занесенной в память микропроцессора.

В итоге, создан образец портативного прибора для экспресс-анализа водо-нефтяной эмульсии, для него определена однозначная калибровочная кривая. Разработанный анализатор позволяет определять концентрацию воды в водо-нефтяной смеси в диапазоне от 0 до 80% с точностью ~2-3%.

Предложенный подход к созданию портативных оптических анализаторов нового поколения позволяет обеспечить быстрые и достаточно точные измерения, значительно уменьшив размеры и энергопотребление прибора. Разработанная методика использования светодиодных матриц на основе гетероструктур средней ИК области с различным количеством элементов делает возможным решение множества других задач, связанных с экспресс-анализом многокомпонентных сред в медицине, экологии, химической, пищевой промышленности и т.д.

Публикации

- Т.Н. Данилова, Б.Е. Журтанов, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев «Светодиоды на основе твердых растворов GaSb для средней инфракрасной области спектра 1.6-4.4 мкм. Обзор». ФТП. 2005. Т.39. В.11. С.1281-1311.
- Н.Д.Стоянов, А.П.Астахова, С.С.Молчанов, С.С.Кижаев, Б.Е.Журтанов, К.В.Калинина, Т.И.Гурина, М.П.Михайлова, А.Н. Именков, Ю.П.Яковлев «Разработка мощных светодиодов на основе наногетероструктур для среднего ИК диапазона (1.6-4.6мкм) и их применение в портативных оптических анализаторах газов и жидкостей нового поколения» // Rusnanotech 2008. Т.1. С.176-178.
- А.Н.Именков, Б.Е.Журтанов, А.П.Астахова, К.В.Калинина, М.П.Михайлова, М.А.Сиповская, Н.Д.Стоянов «Фотодиоды для спектрального диапазона 1.1-2.4 µm на основе двойной гетероструктуры n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb, выращенной с использованием редкоземельных элементов». Письма в ЖТФ. 2009. Т.35. В.2. С.6-35.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СЕНСОР ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР И ДИОДОВ ШОТТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А³В⁵

Базовое подразделение — лаборатория Инфракрасной оптоэлектроники

Разработан малогабаритный сенсорный модуль для регистрации водорода, включающего оптопару светодиодный излучатель — фоточувствительный элемент с Pd контактом, термохолодильник и терморезистор. Преимуществами такого сенсорного модуля являются компактность, быстродействие, низкое энергопотребление и большой срок службы.

В последние годы в связи с проблемой глобального потепления большое внимание уделяется поиску альтернативных источников энергии, при этом возник стойкий интерес к развитию водородной энергетики. Наряду с проблемой генерации водорода и создания топливных элементов, активно ведутся работы по созданию надежных и высокочувствительных сенсоров водорода. Такие приборы нужны для регистрации утечек водорода из топливных элементов, а также при его транспортировке и хранении. Особое внимание уделяется детектированию взрывоопасных концентрации водорода (4.7%). Другими важными требованиями к таким сенсорам являются необходимость стабильной работы при комнатной температуре, низкое энергопотребление, низкая стоимость, простота в эксплуатации и миниатюрность. Однако до настоящего времени промышленно выпускаемые сенсоры водорода не отвечают требованиям водородной энергетики.

Концепция созданного оптоэлектронного сенсора водорода

В основе концепции лежит использование сильной зависимости фотоЭДС гетероструктур А³В⁵ с Pd контактом от концентрации водорода. Ранее в Институте было изучено влияние водорода на фоточувствительность диодов Шоттки с палладиевыми контактами на основе Si-SiO₂, InP, InGaAs. Оказалось, что для всех этих структур имеется общая закономерность: в газовой смеси с водородом изменение фотоЭДС при облучении структур инфракрастным светом на порядок

сильнее, чем лежащее в основе существующих сенсоров влияние водорода на электрические характеристики твердотельных элементов. При освещении структуры со стороны Pd слоя, фотоны генерируют пары носителей электрон-дырка. Величина возникающей фотоЭДС зависит от толщины области объемного заряда (обедненной области у поверхности) в которой происходит разделение носителей. Незначительное изменение заряженного слоя H⁺ может приводить к существенному изменению толщины области объемного заряда в полупроводнике и, как следствие, к изменению фотоЭДС. Данный факт обуславливает преимущество фотоэлектрического способа регистрации водорода по сравнению с его регистрацией по изменению электрических параметров.

Результаты экспериментов

Предварительное исследование Si-MOП структур на основе *n* – и *p*-Si показало, что в структурах n-типа наблюдается резкое, более чем на порядок уменьшение фотоЭДС, а в p-Si МДП структурах – увеличение фотоЭДС при воздействии импульса H₂. Было показано, что эти эфекты связаны с изменением высоты барьера Шоттки на границе Si-Pd за счет изменения заряда дипольного слоя. При этом время релаксации (восстановление фотоэдс после воздействия H₂) составляло 1-2 мин. Время нарастания импульса фотоэдс составило порядка 1-2 с.

Были исследованы электрические и фотоэлектрические характеристики диодов Шоттки на основе гетероструктур Pd-InAsSbP/InAs, Pd-GaInAsP/InP и Pd-GalnAsSb/GaSb, а также механизмы влияния адсорбции водорода на эти характеристики. Как и следовало ожидать, барьер Шоттки в структуре р-типа оказался существенно выше. Отсечка прямой ветки вольтамперной характеристики соответствует значению ф~0.8В. В структуре n-типа данная величина составила 0.3 В. Анализ показал, что процесс токопрохождения можно охарактеризовать как процесс двойной инжекции носителей в эпитаксиальный слой. Основным процессом, определяющим величину статического темнового тока двойной инжекции, является рекомбинация неосновных носителей тока в различных частях структуры. При этом время жизни неравновесных носителей зависит от концентрации и положения уровней в запрешенной зоне разных слоев полупроводника.

Исследования показали, что для структуры n⁺-In-P/n-GaInAsP/Pd фотоЭДС в присутствии H₂ в газовой смеси 0.03% уменьшается на два порядка. При этом данное уменьшение практически не зависит от длины волны излучения в широком спектральном диапазоне. Положительно заряженный слой H⁺ на поверхности тонкого диэлектрического слоя притягивает электроны к поверхности полупроводника и смещает пространственное распределение носителей в сторону уменьшения толщины обедненной области (рисунок 1). Как следствие малое изменение концентрации водорода в среде приводит к очень сильному уменьшению фотоЭДС. Такая структура удобна для измерения малых концентраций водорода.

Для структуры p⁺-InP/p-GaInAsP/Pd напротив, наблюдалось увеличение фотоЭДС в присутствии водорода (рисунок 2). В данном случае положительно заряженный слой H⁺ притягивая электроны, увеличивает обедненную область в p-полупроводнике и как следствие возрастает фотоЭДС. Эту структуру удобно использовать для измерения больших концентрации водорода, при которых сигнал в структуре n-типа достигает сложно измеримых малых значений. При освещении образцов и увеличении обратного смещения, приложенного к диоду Шоттки, фототок возрастает как за счет увеличения толщины области объемного заряда, так и за счет увеличения времени жизни носителей заряда при сдвиге положения уровня Ферми относительно уровней захвата.



Было исследовано также влияние температуры и влажности на фотоЭДС структур n⁺-InP/n-GaInAsP/Pd и p⁺-InP/p-GaInAsP/Pd. Поскольку с ростом температуры увеличивается степень диссоциации молекул водорода на положительные ионы: H₂→H⁺+H⁺ в палладиевом слое, это приводит к увеличению чувствительности



Рисунок 3. Конструкция сенсорного модуля

фотоэлектрического элемента к водороду. С другой стороны, уменьшение величины фотоЭДС (без водорода) и увеличение темнового тока с ростом температуры усложняет измерение изменения фотоЭДС при изменении концентрации водорода.

Для обеих структур n+-InP/n-GaInAsP/Pd и p+-In-P/p-GaInAsP/Pd наблюдалось практически линейное возрастание фотоЭДС с увеличением концентрации молекул H₂O в среде. При резком увеличении влажности потока фототок достигает максимума за 1-2 сек, а после выключения потока спадает за 25-30 сек. Причиной такой зависимости по нашему мнению является адсорбция молекул воды на поверхности палладия с последующей ориентацией дипольных молекул в соответствии с типом проводимости полупроводника. В обоих случаях это приводит к увеличению ширины области объемного заряда и соответственно, к увеличению фотоЭДС. Зависимость фотоЭДС от влажности создает определенные проблемы для использования исследуемых структур в качестве сенсоров водорода. Однако, данная проблема вполне решаема. Во-первых, одновременное использование в одном сенсоре структур р – и п-типа позволит измерять с высокой степенью селективности и концентрацию водорода, и процент влажности. Во-вторых, влажность может быть измерена точно оптическим способом с помощью оптопары светодиод — фотодиод на полосе поглощения воды (1.94 мкм или 2.7 мкм), которая может быть легко интегрирована в сенсор водорода.

Изучение временных зависимостей (времена изменения фотоЭДС при включении и выключении импульса потока водорода) показало, что при включении потока сухого воздуха с 1% содержанием водорода, фотоЭДС структуры p+-InP/p-GaInAsP/Pd достигает максимум за 1-3 сек и после выключения спадает до первоначального уровня за 40-50 сек. Структура освещалась белым светом со световой температурой Т=3500К. Таким образом, этот процесс малоинерционен и полностью обратим. Для структуры n+-In-P/n-GalnAsP/Pd величина фотоЭДС уменьшается при включении потока, содержащего водород и возвращается до исходного значения после его выключения. При этом временные параметы переходных процессов имеют те же значения (1-3 сек после включения потока и 40-50 сек после его выключения).

Конструкция сенсора водорода

Ключевым элементом оптоэлектронного сенсора водорода является фотоэлектрический элемент диод Шоттки на основе гетероструктуры А³В⁵ с палладиевым контактом. Для получения максимальных значений фотоЭДС необходимо обеспечить высокую эффективность генерации и разделения носителей в области объемного заряда полупроводника. Выращивание с помощью эпитаксиальных методов структурно совершенных тонких слоев гетероструктур позволяет добиться оптимальных условий для генерации и разделения носителей вблизи контакта палладий - полупроводник. Выращиваемые четверные твердые растворы полупроводников А³В⁵ должны обладать минимальной концентрацией носителей заряда и рекомбинационных уровней, связанных с деффектами. Была разработана технология выращивания структурно совершенных гетероструктур, изопериодных к подложкам InP, GaSb и InAs. С помощью фотолитографии были сформированы диоды Шоттки с характерными размерами элементов 350 мкм.

Для получения фотоЭДС и регистрации ее изменении в присутствии водорода необходимо обеспечить управляемое облучение диода Шоттки источником электромагнитного излучения видимого или инфракрасного диапазона. Удобным источником для реализации компактного сенсорного модуля является светодиодный кристалл. Быстродействие светодиода (порядка 10 нс) позволяет использовать импульсный режим работы с синхронным усилением сигнала детектора, что позволяет существенно улучшить соотношение сигнал/шум. Но главные преимущества использования светодиодного чипа в качестве источника излучения являются компактность, низкое потребление электрической энергии и большой срок службы (100 000 часов).

Фотоэлектрический элемент и светодиодный элемент монтировались на теплопроводящих подложках, изготовленных по технологии LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic— керамика, обожженная при низких температурах). Керамические подложки со светодиодным и фотоэлектрическим элементом с помощью токопроводящего клея крепились к термохолодильнику (элемент Пельтье) размером 3х3 мм. На верхней поверхности термохолодильника монтировался бескорпусной термосенсор (терморезистор). При минимальном потреблении электрической мощности (десятки миллиампер) обеспечивается температурная стабилизация сенсора на оптимальной для проведения измерений температуре (10-15°C). Предложенная оригинальная конструкция (рисунок 3) миниатюрного сенсорного модуля (диаметром 9мм) оптимально решает проблему необходимости обеспечения излучения в видимой или инфракрасной области спектра и обеспечивает стабильность результатов измерений при изменении температуры окружающей среды в широком диапазоне.

Фотографии изготовленного опытного образца



Рисунок 4. Фотографии миниатюрного фотоэлектрического сенсора водорода со снятой крышкой (а), с крышкой (б).

миниатюрного сенсора водорода представлены на рисунках 4 а и б.

Таким образом, подтверждена возможность практического применения эффекта влияния водорода на фотоэлектрические характеристики диодных структур с палладиевым контактом. Максимальная чувствительность к водороду (уменьшение фотоЭДС более чем на два порядка) была достигнута на диодах Шоттки с Pd контактом на основе гетероструктуры n+-lnP/n-GalnAsP. Для измерения больших концентраций удобнее использовать гетероструктуру p+-lnP/p-GalnAsP в которой происходит увеличение фотоЭДС с ростом концентрации водорода за счет повышения высоты барьера Шоттки и толщины области объемного заряда.

ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ, РЕЗУЛЬТАТЫ

ФИЗИКА КОСМОСА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИКА В ФТИ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ

Базовые подразделения: лаборатория Экспериментальной астрофизики и лаборатория Космических лучей

Исследования в области экспериментальной астрофизики развиваются в ФТИ им. А. Ф. Иоффе с середины 60-х годов прошлого века по инициативе академика Б.П. Константинова [1]. Институт стал одним из мировых лидеров в области дистанционных исследований состава поверхности Луны (эксперимент РИФМА), исследований космической пыли, космического гамма-излучения и солнечных вспышек.

Цикл исследований химического состава лунного грунта рентгеновским флюоресцентным методом анализа был выполнен в Институте под руководством Б.П. Константинов, М.М. Бредова и Г.Е. Кочарова.

Исследования зарядового состава космических лучей

Исследования зарядового состава космических лучей осуществлялись с помощью ядерных фотоэмульсий и твердотельных трековых детекторов ПЛАТАН (рис. 1), возвращаемых с орбиты после длительной экспозиции. Работы проводились под руководством Н.С. Ивановой, Ю.А. Гагарина и В.А. Дергачева. С помощью искровых камер с постоянными магнитами в экспериментах на высотных аэростатах были открыты антипротоны в космических лучах. Поиск и исследования антипротонов в космических лучах выполнялись под руководством В.А. Романова и Э.А. Богомолова.

Измерения потоков космической пыли в околоземном пространстве, изучение структуры пылевой комы кометы Галлея в проектах «ВЕГА» и исследования космического гамма-излучения, космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров велись под руководством члена-корреспондента РАН Е.П. Мазеца.

Исследования потоков космической пыли и пылевой комы в голове кометы Галлея



Рисунок 1. Детектор ПЛАТАН на Международной космической станции

Для проведения экспериментов по изучению потоков космической пыли, проводившихся на бортах спутников Космос-135 и Космос-163, по инициативе Е.П. Мазеца была реализована не применявшаяся ранее схема размещения пьезоэлектрических датчиков в составе детекторов космической пыли. Было предложено акустически изолировать датчики от корпуса спутника с помощью «сэндвича» из фторопластовых пластин. Применение нового технического решения позволило экспериментально доказать, что поток пылевых частиц вблизи орбит спутников хорошо совпадает с имевшимися измерениями пылевых частиц в межпланетном пространстве. Тем самым была опровергнута гипотеза о пылевом облаке вокруг Земли и получены надежные данные о полном притоке космического вешества на Землю. Результаты экспериментов легли в основу модели распределения микрометеоритов в космическом пространстве, принятой на сессии КОСПАР.

В рамках международного проекта «ВЕГА» были



Рисунок 2. Научная аппаратура ФТИ им. А.Ф. Иоффе, использовавшаяся для регистрации кометной пыли на межпланетных станциях «Bera-1» и «Bera-2»

выполнены успешные исследования пылевой комы кометы Галлея в широкой области масс частиц от 10⁻¹⁶ г. до 10⁻⁶ г. В аппаратуре, разработанной в Институте для станций «ВЕГА-1» и «ВЕГА-2», использовались два типа датчиков — пьезоэлектрические и ионизационные с перекрытием областей чувствительности (рис. 2). В результате при пролете станций в окрестности кометы Галлея была получена детальная картина строения пылевой комы и распределения кометных частиц по массе, изучено угловое распределение и интенсивность выброса пыли из ядра кометы, определены характеристики пылевых струй. По полноте и надежности эти уникальные данные существенно превзошли результаты измерений кометной пыли, полученные в ходе европейской миссии «Джотто».

Исследования диффузного фонового гамма-излучения

Для исследований диффузного фонового гамма-излучения был создан высокочувствительный гамма-спектрометр с многоканальным анализатором, содержащим блок оперативной памяти. Это был один из первых в мире многоканальных амплитудных анализаторов с внутренней памятью, примененный на космическом аппарате. В экспериментах на спутниках Космос-135, Космос-163 и Космос-461 были впервые детально исследованы интенсивность и спектр диффузного космического фонового излучения с энергией 30 кэВ — 4,1 МэВ, установлена высокая степень изотропии этого излучения и, тем самым, доказана его внегалактическая природа, подробно изучены фоновые эффекты, сопровождающие измерения космического гамма-излучения на околоземных орбитах, разработан оригинальный метод выделения космической компоненты излучения с использованием геомагнитных зависимостей, получен спектр диффузного гамма-излучения.

Исследования космических гамма-всплесков на АМС «Венера 11-14» – аппаратура и результаты наблюдений

Для исследований на станциях «Венера» была разработана и изготовлена оригинальная высокочувствительная и высокоинформативная научная аппаратура КОНУС. Аппаратура содержала в своем составе детекторную систему из шести сцинтилляционных детекторов диаметром 80 мм и толщиной 16 мм с анизотропной диаграммой угловой чувствительности, позволяющей автономно определять направление на источник гамма-всплеска. По запросу ФТИ им. А.Ф. Иоффе станции разводились друг от друга на расстояния в несколько десятков миллионов километров, что позволяло с высокой точностью локализовать источники гамма-всплесков триангуляционным методом. В экспериментах КОНУС на станциях Венера 11-14 впервые было обнаружено бимодальное распределение гамма-всплесков по длительности, показавшее, что всплески по длительности делятся на короткие, с длительностью менее 2-х секунд, и длинные, более 2-х секунд. Также впервые было показано, что источники гамма-всплесков распределены равномерно по небесной сфере (рис. 3). Была установлена корреляция между интенсивностью событий и их жесткостью. В научной литературе это соотношение получило название



Рисунок 3. Распределение источников гаммавсплесков по небесной сфере по данным экспериментов КОНУС на АМС «Венера 11-14»

«соотношение Голенецкого».

Фундаментальным результатом экспериментов КО-НУС на АМС «Венера 11-14» явилось открытие нового класса астрофизических объектов, получивших позднее название мягкие гамма-репитеры (рис. 10). За их открытие была присуждена в 2007 г. премия РАН имени академика Белопольского.

Исследования космических гамма-всплесков в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД

Новый этап исследований космических гамма-всплесков в ФТИ им. А.Ф. Иоффе начался, когда аппаратура КОНУС была установлена на борту американского космического аппарата ВИНД. В соответствии с Соглашением между Роскосомосом и НАСА о совместном эксперименте американская сторона ответственна за прием телеметрической информации с космического аппарата ВИНД и передачу ее по сети Интернет в ФТИ им. А.Ф. Иоффе для обработки. Аппаратура КОНУС-ВИНД [2] представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр с двумя детекторами, установленными на противоположных сторонах космического аппарата ВИНД. Каждый детектор представляет собой сцинтилляционный кристалл NaJ(TI) диаметром 130 мм и высотой 75 мм, помещенный в тонкостенный алюминиевый контейнер с бериллиевым входным окном и выходным окном из свинцового стекла высокой прозрачности. По степени защиты от фонового излучения, связанной с элементами конструкций космического аппарата, детекторы не имеют аналогов в мировой практике регистрации излучения гамма-всплесков. Энергетический диапазон детекторов составляет 20 кэВ — 15 МэВ, минимальное разрешение временных профилей – 2 мс. Специальный канал с энерговыделением более 15 МэВ предназначен для регистрации заряженных частиц.

Из наиболее важных результатов всеволновых наблюдений источников гамма-всплесков в эксперименте КОНУС-ВИНД следует отметить наблюдения двух событий GRB050820A и GRB080319B. Оптическое излучение первого из этих всплесков было зарегистрировано телескопом RAPTOR Лос-Аламосской лаборатории. Сопоставление с данными о гамма-излучении позволило впервые обнаружить одновременное увеличение потока оптического и гамма-излучения от источника всплеска. Второе из указанных событий явилось самым ярким в оптической области всплеском с оптической светимостью в максимуме до 5,3 звездной величины и интегральным потоком гамма-излучения 6,23±0,13 x10⁻⁴ эрг см⁻² (рис. 5). Данные эксперимента КОНУС-ВИНД свидетельствуют, что гамма – и оптическое излучение этого всплеска, зарегистрированное телескопом Рi of the Sky, начинается и заканчивается в одно и тоже время, подтверждая, что







Рисунок 5. Схема наблюдений гигантской вспышки гамма-репитера SGR1806-20 с космических аппаратов ВИНД и КОРОНАС 27 декабря 2005г.

они происходят из одной области пространства. Сопоставление излучения всплеска в оптическом, рентгеновском и гамма – диапазонах позволяет объяснить наблюдаемую картину с помощью двухкомпонентной модели релятивистского джета, в которой гамма-излучение генерируется узким (~ 0,4°) конусом ультрарелятивистских частиц от образования черной дыры. За послесвечение всплеска отвечает окружающий его конус с углом раствора ~8°.

Уникальная ситуация с исследованием гигантской вспышкой от гамма-репитера SGR1806-20 произошла 27 декабря 2005 г. Интенсивность гамма-излучения гигантских вспышек гамма-репитеров столь велика, что сцинтилляционные детекторы на космических аппаратах входят в режим насыщения и измерения с их помощью становятся невозможными. Именно так и произошло с детектором КОНУС-ВИНД, который подвергся воздействию гамма-излучения этой гигантской вспышки. В момент гигантской вспышки космический аппарат «Коронас» оказался экранирован Землей от прямого воздействия излучения гигантской вспышки. Размещённая на КА «Коронас» аппаратура ГЕЛИКОН, созданная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и аналогичная аппаратуре КОНУС-ВИНД по своему составу и программе измерений, смогла зарегистрировать отраженное от



Рисунок 6. Временной профиль гигантской вспышки SGR1806-20 по данным наблюдений в экспериментах КОНУС-ВИНД и ГЕЛИКОН

поверхности Луны гамма-излучение (рис. 5).

Это позволило впервые в мировой практике исследования гамма-репитеров корректно восстановить временной профиль гигантской вспышки и его энергетику (рис. 6) [3].

Из результатов эксперимента КОНУС-ВИНД, полученных на протяжении последних нескольких лет, следует отметить создание двух каталогов гамма-всплесков. Это каталог коротких гамма-всплесков 4.

и каталог гамма-всплесков с известным космологическим красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме [5]. В каталоге коротких всплесков реализован метод классификации событий в плоскости жесткость-длительность на короткие/жесткие (тип I, предполагается, что они связаны со слиянием релятивистских компактных объектов) и на длинные/мягкие (тип II, предполагается, что они связаны с коллапсом массивной звезды) (рис. 7). В каталоге отдельно рассмотрены характеристики немногочисленной группы событий, относящихся по параметрам основного начального импульса к коротким/жестким всплескам, но сопровождающимся более слабым и мягким продленным излучением. Такие события были впервые подробно изучены в эксперименте КОНУС-ВИНД.

В каталог гамма-всплесков с известным космологическим красным смещением [5] вошли 150 событий, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте КОНУС-ВИНД с февраля 1997 г. по июнь 2016 г. Для 32-х гамма-всплесков ахроматический излом в кривой блеска послесвечения позволяет определить угол коллимации излучения. Для всех событий каталога был оценен гипотетический горизонт регистрации (космологический предел детектируемости) в эксперименте КОНУС-ВИНД, который, например, для сверхъяркого



Рисунок 7. Распределение гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-ВИНД. Группировка гамма-всплесков в плоскости жесткостьдлительность отражает два физических типа событий: тип I — короткие/жесткие (слияние компактных объектов) и тип II — длинные/мягкие (коллапс ядра массивной звезды). GRB 110918А соответствует возрасту Вселенной ~200 млн. лет после Большого взрыва (z_{max}~ 16,6). На основе каталога была оценена космологическая эволюция энергетики гамма-всплесков.

По значимости, качеству и полноте данных российско-американский эксперимент КОНУС-ВИНД находится среди мировых лидеров в области исследований экстремальных по энергетике взрывных явлений во Вселенной. Эксперимент КОНУС-ВИНД является опорным сегментом межпланетной сети космических аппаратов с детекторами гамма-излучения IPN (Interplanetary Network), в состав которой входят 7 космических аппаратов. С началом эпохи гравитационно-волновой астрономии данные эксперимента КОНУС-ВИНД стали использоваться как для поиска гамма-излучения от источников сигналов гравитационных волн, так и для определения их позиции с помощью сети IPN.

Публикации

- Константинов Б. П. и др., Космические исследования, 1967, т. 7, № 6, 911-917
- 2. Aptekar R. L. et al., Space Science Review, 71, 265-272 (1995)
- Фредерикс Д.Д.и др., Письма в Астрономический журнал, 33, 3-21, (2006)
- Svinkin D. S. et al, Astrohysical Journal Supplement, 224, 10, (2016)
- 5. Tsvetkova A. E. et al, Astrohysical Journal, 850, 161, (2017)

КОСМОЛОГИЯ. МЕЖЗВЕЗДНАЯ И МЕЖГАЛАКТИЧЕСКАЯ СРЕДА РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ. Абсорбционные спектры квазаров.

Базовое подразделение — сектор Теоретической астрофизики

В последнее время со стремительной скоростью развиваются методы наблюдательной космологии, которые позволяют исследовать вещество и различные объекты в ранней Вселенной, находящихся на значительных космологических расстояниях (млрд. световых лет). При этом как показывают численные расчеты и современные наблюдения, в первые несколько миллиардов лет после Большого Взрыва, происходит бурная эволюция объектов во Вселенной, состоящих из барионного вещества (таких как галактики, квазары и др.). Первые звезды и галактики зарождаются, когда возраст Вселенной был меньше 1 миллиарда лет. Излучение от первых звёзд приводит к реионизации Вселенной. Большая часть барионов в это время находится в межгалактическом веществе. Вещество, будучи практически полностью нейтральным до этого, переходит в почти полностью ионизованное состояние, при этом его температура резко возрастает. Зарождающиеся

галактики в ранней Вселенной также проходят этап стремительного роста и эволюции, обусловленные частым слиянием между собой и существенно более высоким по сравнению с нашей эпохой темпом аккреции межгалактического вещества на них. Аккреция межгалактического вещества - чрезвычайно важный процесс для ранних галактик, который восполняет запасы межзвездного газа, непрерывно расходующегося на процессы звездообразования. Бурная эволюция галактик в ранней Вселенной приводит к тому, что когда возраст Вселенной был около 3 млрд. лет средний темп звездообразования в галактиках был максимальным и более чем на порядок величины превышал современное значение в локальной Вселенной. Дополнительно, за счет аккреции межзвёздного вещества на быстрорастущие сверхмассивные черные дыры, находящиеся в центрах ранних галактик, ядра галактик переходят в активное состояние. Наблюдательным проявлением такой активности является феномен квазаров, светимость которых может на несколько порядков превосходить суммарную светимость всех звёзд родительской галактики. Интенсивность излучения, выделяемого при аккреции вещества на сверхмассивную черную дыру в центре галактики может быть настолько высока, что квазары видны с космологических расстояний, вплоть до красных смещений z ~ 7, соответствующих возрасту Вселенной меньше 1 миллиарда лет. В тоже время при красных смещениях z > 2 поток излучения от галактик настолько падает, что даже при наблюдении на крупнейших современных наземных и орбитальных обсерваториях фактически можно увидеть и исследовать только самые яркие из галактик. Вот почему квазары предоставляют нам уникальную возможность для изучения межгалактического и межзвёздного вещества ранней Вселенной, находящегося на луче зрения между квазаром и наблюдателем. Работы нашей группы в ФТИ, используют и развивают методы исследования абсорбционных систем в спектрах квазаров.



Рисунок 1. Абсорбционный спектр квазара. Большинство линий поглощения в спектре квазара — это линии Лаймановской серии нейтрального водорода, образующиеся в спектре при прохождении излучения от квазара через межгалактическую среду, попадающую на луч зрения квазар-наблюдатель. За счет космологического красного смещения линии поглощения от разных абсорбционных систем сдвигаются в сторону больших длин волн. Иногда на луч зрения попадает галактика, тогда в спектре квазара появляется так называемая DLA система, включающая богатый набор различных атомарных и молекулярных линий поглощения, формирующихся при прохождении излучения через межзвёздную и около-галактическую среду удаленной галактики.

Спектроскопия квазаров.

При прохождении излучения квазара через вещество во Вселенной (межгалактическое и межзвёздное вещество удаленных галактик) в его спектре образуются линии поглощения. Учитывая, что свет от квазара распространяется в расширяющейся Вселенной, поглощение от различных облаков возникает в различные космологические эпохи, таким образом, линии поглощения оказываются сдвинутыми друг относительно друга на космологическое красное смещение. Поэтому анализ абсорбционных линий в спектре квазаров позволяет исследовать распределение межзвёздного и межгалактического вещества во Вселенной, определять химический состав и физические условия, существовавшие в ранней Вселенной (10-12 млрд. лет назад), и их эволюцию, т.е. фактически, строить "томограмму" большой части наблюдаемой Вселенной. Большинство линий разрешенных электронных переходов в атомах и молекулах, находящихся в газовой фазе межзвёздного, около галактического и межгалактического вещества попадает в УФ диапазон. Однако космологическое красное смещение сдвигает абсорбционные линии в видимый диапазон, что позволяет получать спектры квазаров на крупных наземных оптических телескопах, и таким образом и чрезвычайно эффективно изучать межзвёздное и межгалактическое вещество на красных смещениях z>2. Так нашей группой впервые были идентифицированы внегалактические молекулы H2 и HD на больших красных смещениях. Обнаружены и исследованы несколько систем атомарного дейтерия D. Это позволяет, используя совместно линии атомарных дейтерия и водорода или молекул H2 и HD, определять относительное содержание дейтерия в веществе с составом близким к первичному [1]. В свою очередь относительное содержание дейтерия является одним из самых чувствительных «бариометров» и позволяет измерить независимым способом один из ключевых параметров космологической модели — количество барионной материи во Вселенной.

Относительные сдвиги различных атомарных и молекулярных переходов позволяют поставить ограничения на возможную космологическую вариацию фундаментальных физических констант (постоянная тонкой структуры, отношение массы протона к электрону и др.) на масштабах времен более 10 млрд. лет [2].

Еще одной космологической задачей является измерение свойств и температуры реликтового излучения, рожденного в первые мгновения Большого Взрыва и сохранившегося до наших времен в виде микроволнового фона, однородно и изотропно заполняющего все пространство Вселенной. Единственным пока доступным способом измерения температуры реликтового излучения на больших красных смещениях является исследование относительной населенности вращательных уровней молекулы СО [3, 4].

Анализ абсорбционных спектров квазаров чрезвычайно важный инструмент для изучения процесса формирования и эволюции галактик в ранней Вселенной, тесной взаимосвязи, существующей между процессом звездообразования в галактиках, состоянием межгалактического и межзвёздного газа, а также активностью ядер этих галактик. Эта взаимосвязь включает в себя такие важные процессы как аккреция межгалактического вещества на галактики и активные ядра галактик, распространение ультрафиолетового излучения от формирующихся звёзд, межгалактические ветры, формирующиеся под воздействием активных ядер галактик и вспышек сверхновых как результат звездообразования. При этом важно, что спектроскопический анализ набора линий различных элементов, от абсорбционной системы на некотором красном смещении, позволяет определять локальные характеристики вещества в этой системе, в том числе оценивать распространённость химических элементов и основные физические параметры среды, такие как плотность, температура и давление [5, 6, 7].

Спектры квазаров, являясь пространственно-временными «фотографиями» нашей Вселенной, позволяют нам и дальше открывать тайны ее природы.

Публикации

- Иванчик А.В., Балашев С.А., Варшалович Д.А., Клименко В.В., Астрономический журнал, т. 92, №2, с. 119-138, 2015
- Ivanchik A., Petitjean P., Varshalovich D., et al., Astronomy & Astrophysics, Vol. 440, No.1, pp. 45-52, 2005
- Notedaeme P., Petitjean P., Srianand R., Astronomy and Astrophysics, v.526, id.L7, 2011
- Sobolev A.I., Ivanchik A.V., Varshalovich D.A., Balashev S.A., Journal of physics: Conference Series, v. 661, pp. 012013, 2015
- Balashev S.A., Noterdaeme P., Rahmani H., et al., MNRAS, v. 470, p. 2890-2910, 2017
- Клименко В.В., Балашев С.А., Иванчик А.В., Варшалович Д.А., Письма в астрономический журнал, т. 42, № 3, стр. 161-188, 2016
- 7. Balashev S.A., Noterdaeme P., Klimenko V.V., Petitjean
 - P., Srianand R., Ledoux C., Ivanchik A.V., Varshalovich D.A., Astronomy and Astrophysics, v. 575, L8, 2015

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ПРИРОДА СВЕРХПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА

Базовые подразделения – сектор Теоретической астрофизики, лаборатория Прикладной математики и математической физики

Нейтронные звезды — единственные известные макроскопические объекты с плотностью вещества до нескольких миллиардов тонн в кубическом сантиметре (что значительно превышает плотность материи в атомных ядрах). Среди звезд они рекордсмены: самые компактные (с радиусами около 12 км при массах около полутора масс Солнца), сверхбыстро вращающиеся (до 700 оборотов в секунду), имеют очень сильные магнитные поля (~10¹⁴ Гс и выше). Ядро звезды может быть сверхтекучим и сверхпроводящим с критическими температурами ~ 10⁸–10¹⁰ К.

Нейтронные звезды были теоретически предвосхищены в 1931 году, за год до открытия нейтрона, Л.Д. Ландау, тогдашним сотрудником ленинградского физтеха. Он написал статью [1], в которой предположил, что могут существовать очень плотные звезды, похожие на гигантское атомное ядро. Так можно представить себе нейтронную звезду и сейчас. Однако эта статья была опубликована лишь в феврале 1932 года. По иронии судьбы, это произошло одновременно с объявлением об открытии нейтрона.

В ФТИ систематическое теоретическое изучение нейтронных звезд началось практически сразу после открытия этих звезд в 1967 г. Постепенно сотрудники ФТИ стали участвовать и в наблюдениях нейтронных звезд.

Сверхъядерные плотности в недрах нейтронных звёзд делают их особенно интересными для фундаментальной физики. Фактически, нейтронные звёзды являются единственными природными лабораториями, которые могут дать ответ на фундаментальный вопрос: каково сверхплотное вещество? Каковы его уравнение состояния и состав (нуклоны, гипероны, кварки, экзотические формы вещества)? Насколько правильно современная физика описывает свойства такого вещества? Ответы на эти вопросы пока не даны, но мощный прогресс наблюдений приближает решение.

Впрочем, исследования нейтронных звезд важны не только для решения описанной фундаментальной проблемы. Ввиду огромной силы тяжести они используются для прецизионной проверки теорий гравитации, одновременные прецизионные наблюдения массива нейтронных звёзд планируется использовать как естественные детекторы гравитационных волн и как средства космической навигации. Астрофизические проявления нейтронных звёзд разнообразны. К ним относятся радио-, рентгеновские и гамма-пульсары, вспыхивающие рентгеновские источники, остатки сверхновых звезд; туманности пульсарного ветра, магнитары, короткие гамма-всплески, возникающие при слиянии нейтронных звёзд, и множество других.

Сейчас нейтронных звёзд известно более 2000. Они многолики — наблюдаются во всех диапазонах электромагнитного спектра, а 17 августа 2017 года гравитационные обсерватории впервые зафиксировали сигнал от слияния двух таких звезд. Ожидается, что нейтронные звезды будут наблюдаться и нейтринными обсерваториями.

Спустя 50 лет после открытия, исследования нейтронных звезд превратились в отдельную обширную ветвь астрофизики, которой занимаются многие группы ученых во всем мире. Широчайший спектр физических условий, реализующийся в этих объектах, требует использования большинства разделов физики: от физики сильных взаимодействий, элементарных частиц,



Рис. 1. Спектры излучения магнитной нейтронной звезды [10]

атомного ядра, до физики конденсированного состояния, квантовой электродинамики, общей теории относительности и т.п. В целом исследования нейтронных звезд можно разделить на три основных направления:

Во-первых, ведутся расчеты микрофизических свойств вещества нейтронных звезд (термодинамики, кинетики, нейтринного излучения, свойств сверхтекучести). Из-за отсутствия точной теории сверхплотного вещества используются разные модели, в которых переплетается фактически весь арсенал теоретической физики.

Во-вторых, имея микрофизику, моделируют строение нейтронных звезд, их тепловую, магнитную и вращательную эволюцию, и всевозможные наблюдаемые процессы. Например, сбои периодов пульсаров, ядерные вспышки в поверхностных слоях звезд, слияния двойных нейтронных звезд и сопутствующее гравитационное излучение.

В-третьих, проводят наблюдения нейтронных звезд на лучших наземных и космических обсерваториях. Результаты сравнивают с результатами теоретического моделирования и отбирают наиболее подходящие теоретические модели сверхплотного вещества.

Ученые ФТИ активно работают по всем трем направлениям. В 2013—2017 годах ими опубликовано около 120 статей в научных журналах высокого уровня, включая три обзора, в существенной степени основанных на оригинальных результатах, которые получены в ФТИ. Кратко изложим основные результаты, полученные в 2013—2017 годах.

Микрофизические свойства сверхплотного вещества

Выполнены циклы работ, посвященные кинетическим свойствам различных слоев нейтронных звезд (см., например, обзор [2]), скорости их нейтринного охлаждения, сверхтекучей релятивистской гидродинамике сверхплотного вещества. В одном из циклов исследованы термодинамические и упругие свойства





кулоновских кристаллов атомных ядер в коре нейтронной звезды с магнитным полем. В частности, показано [3], что в неоднородном магнитном поле кристалл может растягиваться или сжиматься, создавая анизотропное давление вещества. Вычислены предельные деформации, при которых кристалл становится неустойчивым. Эти результаты важны для объяснения наблюдаемой активности нейтронных звезд с очень сильным магнитным полем. Полученные аналитические аппроксимации ряда уравнений состояния и параметров моделей нейтронных звезд широко используются специалистами.

Моделирование процессов в нейтронных звездах

Выполнено моделирование и проведён анализ: собственных колебаний сверхтекучих нейтронных звезд; неустойчивости колебаний вращающихся магнитных нейтронных звезд с излучением гравитационных волн; эволюции вращения радиопульсаров на больших временных масштабах с учётом внутреннего дифференциального вращения звезд; тепловой эволюции изолированных и аккрецирующих нейтронных звезд без учета и с учетом внутренних источников подогрева.

Построены новые модели излучения магнитных нейтронных звезд, учитывающие неполную ионизацию элементов в их атмосферах [4]. Рис. 1 показывает вычисленные локальные спектры излучения звезды с водородной атмосферой и магнитным полем B=10¹¹Гс при разных температурах поверхности Т_{еff} с учётом неполной ионизации в сравнении с моделями полностью ионизованной атмосферы.

Особенно интересен оригинальный сценарий эволюции быстровращающихся нейтронных звезд в тесных маломассивных двойных системах. При достаточно быстром вращении и высокой температуре в таких звездах развиваются колебания, сопровождающиеся излучением гравитационных волн, которое тормозит вращение звезды. Часть выделяемой вращательной энергии идет на раскачку колебаний и нагрев звезды, приводя к неустойчивости. Однако наблюдения некоторых источников свидетельствуют о подавлении неустойчивости (рис. 2), механизм которого неясен. В рамках оригинальной теории [5] подавление происходит за счет резонансного взаимодействия мод колебаний сверхтекучей звезды при определенных «резонансных» внутренних температурах. Рис. 2 показывает наблюдаемые объекты на диаграмме частота вращения — внутренняя температура звезды Т. (в единицах 10⁸ К). Затемненная область отвечает устойчивым нейтронным звездам, а светлая — неустойчивым. Вертикальные затемненные пики отвечают тем областям, где резонансное взаимодействие подавляет неустойчивость. Как видно из рисунка, эта модель согласуется с наблюдениями.

Наблюдения нейтронных звезд и сравнение с теоретическими моделями

Сотрудники ФТИ проводят наблюдения нейтронных звёзд во всех спектральных диапазонах на крупнейших наземных и орбитальных обсерваториях. В последние годы использовались 8-метровый телескоп VLT (Very Large Telescope), 10-метровый телескоп GTC (Gran Telescopio CANARIAS), крупнейший отечественный 6-метровый телескоп БТА (Большой телескоп азимутальный), 8-метровый телескоп обсерватории Gemini, австралийский радиоинтерферометр ATCA. Проводились наблюдения и на орбитальных рентгеновских обсерваториях Chandra и XMM-Newton, инфракрасном телескопе Spitzer.

Пример таких наблюдений для гамма-пульсара J0633+0632, проведенных обсерваторией Chandra, представлен на рис 3а. Временные профили того же пульсара в трёх диапазонах показаны на рис. 3б.

В результате установлен ряд новых ограничений: на форму спектра излучения нейтронных звёзд в широком спектральном диапазоне, на расстояния и температуры поверхностей нейтронных звезд. Измерено



Right ascension

Рис. За. Рентгеновское изображение гамма-пульсара J0633+0632 и его туманности, полученное обсерваторией Chandra [12]



Рис 36. Профили импульса пульсара J0633+ 0632 в гамма и рентгеновском диапазонах по данным обсерваторий Fermi и XMM-Newton.

собственное движение нескольких пульсаров, для ряда объектов исследовано их ближайшее окружение – остатки сверхновых и туманности пульсарного ветра.

Публикации

- 1. L.D. Landau. On the theory of stars // Phys. Z. Sowjetunion, 1, 285 (1932)
- A.Y. Potekhin, J.A. Pons, D. Page. Neutron stars cooling and transport // Space Sci. Rev., 191, 239 (2015)
- D.A. Baiko, A.A. Kozhberov. Anisotropic crystal structure of magnetized neutron star crust // MNRAS, 470, 517 (2017)
- A.Y. Potekhin, G. Chabrier, W.C.G. Ho. Opacities and spectra of hydrogen atmospheres of moderately magnetized neutron stars // Astron. Astrophys., 572, A69 (2014)
- M.E. Gusakov, A.I. Chugunov, E.M. Kantor. Instability windows and evolution of rapidly rotating neutron stars // Phys. Rev. Lett, 112, 151101 (2014)
- A. Danilenko, P. Shternin, A. Karpova, D. Zyuzin, Yu. Shibanov. The γ-ray pulsar J0633+0632 in X-rays // Publ. Astron. Soc. Australia, 32, e038 (2015)

ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

лаб. Ядерной космической физики и лаб. Космических лучей

Изучение солнечной активности является одной из наиболее важных задач современной астрофизики. Плазма в недрах и атмосфере звезды характеризуется чрезвычайно широким диапазоном значений концентрации и температуры, что проявляется в генерации нейтринных потоков, электромагнитного излучения в интервале от радио до гамма длин волн. Наличие локальных активных областей с магнитными полями ~ 1000 Гс приводит к вспышкам. событиям мощного энерговыделения (~10³² эрг) в течение десятка минут, в которых происходит ускорение электронов, протонов и ядер тяжелых элементов. В этом смысле вспышечная плазма представляет уникальную возможность для исследования процесса ускорения частиц, их распространения и излучения. Кроме того, в настоящее время не вызывает сомнения влияние солнечной активности на магнитосферу Земли, на процессы в атмосфере, климат и жизнедеятельность человека. Предсказание вспышек одна из главных "практических" проблем изучения солнечной активности. До середины прошлого столетия изучение солнечных вспышек проводилось в оптическом диапазоне с помощью наземных телескопов. И потому вспышки первоначально назывались оптическими. Но с возникновением спутниковой техники появилась возможность выносить научные приборы за пределы земной атмосферы, и выяснилось, что проявления солнечной активности гораздо более информативны в рентгеновском диапазоне дпин вопн.

Как известно, рентгеновское излучение распространяется в плазме атмосферы Солнца и межпланетном пространстве практически не претерпевая изменения параметров. И потому экспериментальные данные о спектральных и временных характеристиках рентгеновского излучения солнечных вспышек содержат наиболее прямую информацию о процессах взрывного характера выделения энергии во время вспышек и о физических параметрах вспышечной плазмы. В сочетании с результатами, полученными в ультрафиолетовом (УФ), оптическом, радио – и гамма – диапазонах (в том числе с изображениями вспышечных областей), последние являются основой для построения физических моделей солнечных вспышек.

По инициативе академика Вернова С.Н. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе с начала 70-х годов начали проводиться исследования солнечной активности в рентгеновском диапазоне длин волн в лаборатории Ядерной космической физики (зав. лабораторией Г.Е. Кочаров).

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ СЕРИИ "ПРОГНОЗ"

Уникальная орбита спутников серии "Прогноз" — удаленность от Земли в апогее достигала ~200000 км позволяла проводить практически непрерывные измерения рентгеновского излучения Солнца на

длительной временной шкале, как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности.

Рентгеновские гамма спектрометры РГС, РГС – 1, РГС — 1М измеряли излучение в диапазоне энергий 2



Рисунок 1. Космический аппарат (КА) «Прогноз»

кэВ — 200 кэВ в период с 1975 по 1977 гг. на космических аппаратах "Прогноз – 4, 5, 6". В состав спектрометров входили пропорциональные и сцинтилляционные счетчики, разработанные, изготовленные и оттестированные в лаборатории ЯКФ. Для повышения ресурса работы газонаполненных пропорциональных детекторов, в них в качестве рабочего газа применялся чистый ксенон без органических добавок, которые разлагаются в процессе работы счетчика. Период измерений 1975 — 1978 гг. характеризовался минимумом солнечной активности, поэтому в основном регистрировалось мягкое рентгеновское излучение — фоновое от Солнца и во время тепловых вспышек рентгеновского класса не выше С.



Рисунок 2. Орбита КА «Прогноз»

Наиболее информативными явились продолжившиеся измерения рентгеновского излучения в 1978 — 1979 гг. на спутнике «Прогноз-7». Блоки спектрометра РГС представлены ниже — слева – пропорциональные, справа – сцинтилляционные детекторы.

В эксперименте для расширения динамического диапазона впервые одновременно использовались два пропорциональных детектора с соотношением площадей входных окон 1:100. При работе счетчика с большим окном чувствительность в мягком рентгеновском диапазоне составляла ~10⁻⁷ эрг·см⁻²·с⁻¹, что позволило измерять даже малые превышения потока



Рисунок 3. Прибор РГС-1М

над фоном, тем самым изучать слабую предвспышечную активность.

Излучение в диапазоне 20-80 кэВ измерялось с помощью двух сцинтилляционных счетчиков на основе кристаллов Nal(TI) диаметром 80 мм и толщиной 10 и 80 мм, окруженных пластическим сцинтиллятором. Чувствительность в жестком рентгеновском диапазоне составляла ~10⁻⁸ эрг·см⁻²·с⁻¹.

В период, близкий к максимуму солнечной активности, за 7 месяцев полёта спутника в жёстком рентгеновском диапазоне зарегистрировано более 600 всплесков. В мягком рентгеновском диапазоне события, связанные со слабыми вспышками и предвестниками вспышек, происходили на порядок чаще. Непрерывность наблюдений и высокая чувствительность прибора в мягком рентгеновском диапазоне дали обширный материал для изучения предвспышечной эволюции активных областей на многочасовой шкале и предвестников вспышек в мягком рентгеновском диапазоне. Впервые в мире были классифицированы 3 типа рентгеновских предвестников на часовой шкале до начала вспышки. Наиболее часто регистрировались предвестники за 10 – 20 минут до вспышек. Впоследствии подобного рода всплески были обнаружены в наземных наблюдениях в радио – и оптическом диапазонах длин волн.

На основе непрерывных измерений РГС – 1М впервые был создан каталог рентгеновских вспышек, включающий около 700 событий с указанием параметров излучения и вспышечной плазмы, который использовался во многих лабораториях СССР при анализе данных других диапазонов.

Кроме патрульных наблюдений, с помощью прибора РГС-1М удалось зарегистрировать жесткое рентгеновское излучение вспышек с уникальным временным разрешением 0.125 с и 0.250 с. Наличие тонкой временной структуры жесткого рентгеновского излучения указывало на временные масштабы процессов ускорения заряженных частиц, их распространения и излучения в плазме вспышек. Такого рода исследования явились пионерскими и открыли новое направление в экспериментах по регистрации жесткого рентгеновского излучения вспышек.



Рис.4 Автоматическая орбитальная управляемая станция (АУОС) «КОРОНАС-Ф»

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ СЕРИИ АУОС "КОРОНАС"

Рентгеновский спектрометр ИРИС

Компоновка и детекторы спектрометра ИРИС

Рентгеновский спектрометр «ИРИС» явился продолжением серии спектрометров, ранее функционировавших на серии спутников "Прогноз". В спектрометре «ИРИС» « для регистрации мягкого рентгеновского излучения в лаборатории были разработаны специальные пропорциональные детекторы с чистым ксеноном в качестве газового наполнения без органических добавок и примесей. Разработанная конструкция исключала применение органических уплотнительных прокладок и клеевых швов, из которых в рабочий газ могли поступать органические примеси, приводящие к постепенному дрейфу характеристик детектора при регистрации большого числа квантов или частиц. Клеевые швы были заменены на пайку, в том числе



Рис.5 Комплекс научной аппаратуры



Рис.6 Прибор «ИРИС» АУОС «КОРОНАС-Ф»

была разработана технология пайки входного бериллиевого окна в лабораторных условиях. Перед наполнением детекторы откачивались в течение месяца с прогревом до 80° С при вакууме ~ 10⁻⁴ мм.рт.ст. Принятые меры обеспечили высокую стабильность характеристик детекторов при длительной (несколько лет) работе их на борту КА в условиях высоких интенсивностей ионизирующих излучений (радиационные пояса Земли, солнечное рентгеновское излучение), что позволило получить равномерный ряд патрульных наблюдений мягкого рентгеновского излучения Солнца.

Высокая чувствительность прибора позволяла решать такие актуальные задачи, как исследование потоков мягкого рентгеновского излучения малой интенсивности на предвспышечной стадии и в слабых вспышках, а также изучать структуру потоков жёсткого рентгеновского излучения во взрывной фазе вспышек на разных временных масштабах.

Энергетический диапазон измерений был расширен до энергий 250 кэВ. Временное разрешение прибора «ИРИС» зависело от режима работы аппаратуры. В режиме «Патруль» выводилась информация в 12 энергетических каналах с временным разрешением 2,5 с. При быстром нарастании интенсивности рентгеновского излучения прибор переключался в режим «Всплеск». При этом в дополнение к патрульной информации формировались 64-х канальные спектры (2 – 150 кэВ) с временным разрешением 1 с и 4-х канальные спектры (24 — 180 кэВ) с разрешением 10 мс. Отметим, что и в настоящее время не проводятся измерения жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) вспышек с меньшим временем регистрации.

В 1994 году прибор «ИРИС» работал на борту АУОС «КОРОНАС-И». Общее время наблюдений, при вычете времени нахождения орбитальной станции «КОРОНАС-И» в радиационных поясах и в тени Земли, за время ориентированного полёта станции составило около 20 суток. За это время в минимуме солнечной активности была зарегистрирована 21 солнечная вспышка.

В период максимума активности 30 июля 2001 г. на орбиту была выведена станция «КОРОНАС-Ф», которая функционировала на орбите до конца 2005 года. На её борту успешно работал высокочувствительный модернизированный рентгеновский спектрометр «ИРИС-М». Период функционирования спутника совпал с максимумом солнечной активности в 23 цикле. В результате работы прибора «ИРИС-М» был получен большой объём информации о спектральных и временных характеристиках мягкого и жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне от 2 до 150 кэВ. В том числе было зарегистрировано 177 вспышек во всплесковом режиме с высоким временным и энергетическим разрешением (1с – 64 энергетических канала + 0.01с — 4 энергетических канала), были проведены измерения ЖРИ мощных солнечных вспышек с рекордным временным разрешением 10 мс в 4-х энергетических каналах. В результате в жестком рентгеновском излучении солнечных вспышек были обнаружены импульсы длительностью всего несколько десятков миллисекунд (см. Рис.). Для восстановления энергетических спектров жесткого рентгеновского излучения и ускоренных электронов была применена методика решения обратной задачи, позволяющая выявлять особенности в спектрах, типа инверсий. Традиционная методика прямого фитирования такими возможностями не обладает. Например, восстановление функции распределения электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 15 апреля 2002 года, на основе данных рентгеновского спектрометра ИРИС, установленного на спутнике КОРОНАС-Ф, обнаружило наличие локального минимума в спектре в области энергий 40-60 кэВ, который, скорее всего, может быть объяснен особенностями процесса ускорения электронов, возможно связанными с различными локальными областями в сложной структуре магнитных полей с наличием аркад вспышечных петель. Дальнейшие исследования структуры магнитного поля для конкретных солнечных вспышек, зарегистрированных на КА Конус-Винд и RHESSI, показали такую возможность последовательного ускорения по мере развития вспышки.

Многоканальные измерения в мягком рентгеновском излучении (2кэВ — 20 кэВ) позволили восстановить временную эволюцию температуры и меры эмиссии вспышечной плазмы в предположении теплового тормозного механизма излучения. Измерения в данном диапазоне позволили выявить класс тепловых рентгеновских вспышек (жесткое рентгеновское излучение не регистрировалось), температура плазмы по оценкам достигала ~107 К и более, для сравнения укажем, что температура в спокойной короне не превышает обычно (1-2) 106 К. Привлекая данные с других аппаратов, удается локализовать источник горячей плазмы — он практически всегда располагается в короне в верхней части вспышечной петли (петель). Как показывают данные ИРИС, в ряде вспышек мягкое рентгеновское излучение опережает по времени





жесткое рентгеновское излучение, хотя регистрируются и обратные временные зависимости. Нагревание плазмы в верхней части петель свидетельствует о локализации инжекции ускоренных частиц (а возможно и локализации процесса ускорения) именно в вершине. Динамическое изменение температуры плазмы соответствует временному ходу интенсивности излучения – максимум температуры совпадал с пиком интенсивности рентгеновского излучения. Вторым параметром, определяющим поток излучения, является мера эмиссии. Для квазитеплового механизма излучения она определяется произведением n2 V, то есть концентрацией заряженных частиц в объеме горячей плазмы (здесь учтено условие квазинейтральности плазмы n_e = z_i n_i = n). Мера эмиссии обычно запаздывает по отношению к росту температуры, ее нарастание продолжается и после достижения пика температуры, что связано с расширением горячей области, при общем охлаждении плазмы. Мера эмиссии достигает значений 10⁴⁷ ÷ 10⁴⁸ см⁻³, оценка объема горячей плазмы по данным RHESSI ~ 10²⁷ см³ приводит к оценке концентрации горячей плазмы ~ 10¹⁰ см⁻³.

СПУТНИК «КОРОНАС-ФОТОН»

Рентгеновский спектрометр-поляриметр ПИНГВИН-М

Спектрометр-поляриметр «ПИНГВИН-М» пред-



Рис.8. Блок «ПИНГВИН-МД» прибора «ПИНГВИН-М»

назначен для измерения временных и спектральных характеристик мягкого и жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек и поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. Прибор штатно функционировал в течение всего периода активной работы станции АУОС «КОРОНАС-ФО-ТОН» (февраль-декабрь 2009года) и, несмотря на то, что период его работы пришелся на рекордно низкую активность Солнца, им было зарегистрировано около



Рис. 9 АУОС «КОРОНАС-ФОТОН»

150 солнечных вспышек. По результатам работы прибора был создан архив данных в FITS –формате.

Определение поляризации в приборе основано на измерении асимметрии поля рассеянного рентгеновского излучения, причем в приборе осуществлялась одновременная регистрация как рассеянного кванта в детекторах приемниках (ДП), так и комптоновского электрона (факта рассеяния) в детекторах рассеивателях (ДР). Мягкое рентгеновское излучение измерялось с помощью 4-х секционных пропорциональных детекторов. Поляризация измерялась в энергетическом диапазоне квантов 20÷150 кэВ, спектры мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 2÷25 кэВ (в 13 энергетических каналах). Прибор имел два режима работы «ПАТРУЛЬ» и «ВСПЫШКА». Базовое временное разрешение для поляриметрической информации – 120 с, (патруль) и 10 с (вспышка) для



Рис.10. Мягкое рентгеновское излучение вспышки рентгеновского класса В2.6, произошедшей 06.06.09 г., в шести энергетических каналах в диапазоне энергий 2,1±12,4 кэВ.

спектрометрической – 10 с. Реально в эксперименте в различные интервалы реализовывалось временное разрешение для поляриметрии — 24 с, 60 с, 120



Рис.11. Фрагмент записи интенсивности мягкого рентгеновского излучения Солнца 06.06.09 г. в четырех энергетических каналах, иллюстрирующий регистрацию непрерывного излучения Солнца в первых двух каналах (2,1 — 3,6 кэВ, 3,6 — 5,2 кэВ) секции S10 детектора мягкого рентгеновского излучения. На графике представлены данные теневых и освещенных участков.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ПОЛЯРИМЕТР ПИНГ-М — ПРОЕКТ «ИНТЕРГЕЛИО-ЗОНД»

ПИНГ-М — рентгеновский спектрометр-поляриметр рентгеновского излучения солнечных вспышек. Прибор создается в сотрудничестве с НИЯУ МИФИ и состоит из двух блоков: блока спектрометрии ПИНГ-ПИРС (НИЯУ МИФИ) и блока поляриметрии ПИНГ-П (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, лаб. Космических лучей).

Степень линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек даёт уникальную информацию об угловом распределении ускоренных электронов в момент тормозного излучения в плазме вспышечных магнитных петель. Данные о величине степени поляризации представляют дополнительную информацию, которая должна приниматься во внимание при решении задачи определения энергетического, углового и пространственного распределения ускоренных электронов в момент их инжекции. Подобная задача кинетики пучка ускоренных электронов в магнитоактивной плазме успешно решается в лаборатории и обеспечивает информацией при проработке эксперимента. Моделирование процесса инжекции и дальнейшего распространения пучков ускоренных электронов в магнитоактивной плазме вспышечных петель предсказывает наиболее реальную величину степени поляризации 10% – 30%. Причем измерения следует проводить в диапазоне энергий квантов выше 30 кэВ. Такие значения требуют высокой эффективности регистрации рентгеновских квантов, определяемой значениями потока, эффективной площади детекторов, временем регистрации.

При анализе задач проекта «Интергелио-Зонд» следует учесть, что минимальное расстояние от Солнца составит 0,3 а.е., среднее расстояние до Солнца



Рис.12. Физическая схема детекторной части блока ПИНГ-П.

в первые 400 дней полёта составит 0,9 а.е., т.е. лишь немногим отличаясь от околоземных орбит. После 400 дней среднее расстояние аппарата от Солнца составит 0,6 а.е. При таком расстоянии потоки излучения будут в три раза больше, чем околоземные, а видимые линейные размеры объектов на Солнце увеличатся в 1,6 раза. Выход КА из плоскости эклиптики достигнет 20 град. через три года полета.

Проведенные к настоящему времени околоземные эксперименты позволили зарегистрировать величину степени поляризации только в единичных мощных солнечных событиях класса Х. При приближении аппарата к Солнцу эффективность измерений степени поляризации жесткого рентгеновского излучения во время вспышек возрастает, что расширяет класс регистрируемых событий.

Особенностью детекторной части блока ПИНГ-П является активный рассеиватель из пластического сцинтиллятора, состоящий из трех кристаллов паратерфенила, каждый из которых просматривается ФЭУ. Наличие в блоке ПИНГ-П трех активных рассеивателей



Рис. 13. Взаимное расположение детекторов блока ПИНГ-П (снизу – отсек электроники).

и шести детекторах-приемниках позволяет обеспечить значительную избыточность поляриметрической информации, что позволяет отделять поляризационные эффекты от приборных. Фактически блок ПИНГ-П представляет собой три различно ориентированных поляриметра (см. рисунки). Применение в качестве активного рассеивателя паратарфенила а не полистирола позволило за счет высокого световыхода опустить нижнюю границу энергетического диапазона работы поляриметра до 20 кэВ, что, с учетом круто спадающего энергетического спектра излучения, существенно повышает чувствительность прибора.

На графике приведены эффективные площади различных поляриметров, функционировавших ранее (СПР-Н и Пингвин-М), и в настоящее время — RHESSI. Эффективная площадь ПИНГ-П на 30% ниже эффективной площади поляриметра ПИНГ-ВИН-М, но т.к. ПИНГ-М будет функционировать на расстоянии 0.7 а. е. от Солнца, его возможности превосходят возможности ПИНГВИН-М.



Рис. 14 Эффективные площади поляриметров.

Список литературы:

- Matveev G.A., Charikov Yu.E., Dmitriev P.B., Kudryavtsev I.V., Lazutkov V.P., Savchenko M.I., Skorodumov D.V. Spectrometer IRIS: Investigation of the Time Structure and Energy Spectra of X-Ray Emission from Solar Flares, 2014, ASSL, p.359 — 400
- Pal'shin, V.D., Charikov Yu.E., Aptekar, R.L. et al., Konus — Wind and Coronas — F observations of solar flares, // Geomagnetism and Aeronomy, 2014, v.54, No8, p. 943
- Melnikov V. F., Charikov Yu.E., Kudryavtsev I.V., Directivity and Polarization Dynamics of Hard X_Ray and Gamma_Ray Emission of a Flare Loop // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 7, p.983
- Motorina G.G., Kudryavtsev I.V.,Lazutkov V.P., et al., Reconstruction of energy spectrum of electrons accelerated in the April 15, 2002 solar flare based on IRIS X — ray spectrometer measurements//J. Tech. Phys., v.61, // Geomagnetism and Aeronomy, N.4, p.525
- Charikov Yu.E., Shabalin A.N., Kuznetsov S.A., Modeling of physical processes by analyses os hard X — ray and microwave radiations in the solar flare of November 10, 2002// Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 57, No. 7, p.1009

ALEGRO — ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ВЫСОКОГОРНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП Нового поколения для исследования быстропеременных космических гамма-источников

Базовые подразделения – лаб. Астрофизики высоких энергий, лаб. Квантоворазмерных гетероструктур, лаб. Масс-спектрометрии, лаб. Нестационарных процессов в полупроводниках, сектор Теоретической астрофизики

Решение актуальных фундаментальных задач современной физики и астрофизики, таких как проверка предсказаний теории фундаментальных взаимодействий и космологических моделей, выяснение природы темного вещества, изучение поведения частиц и полей в условиях недостижимых в земных лабораториях, требует чувствительных наблюдений космических гамма-источников в диапазоне энергий от единиц гигаэлектроновольт (ГэВ) до десятков тераэлектроновольт (ТэВ). Эти наблюдения могут быть выполнены с помощью наземных гамма-телескопов большого диаметра. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе совместно с партнерами из ИЯИ РАН, а также из Ирландии, Италии, Аргентины и Армении, в рамках проекта ALEGRO разрабатывается высокогорный черенковский гамма-телескоп нового поколения. Черенковские телескопы детектируют оптическое и ультрафиолетовое излучение широких атмосферных ливней, вызванных взаимодействием космических гамма-квантов с энергией выше нескольких ГэВ с атмосферой. Ключевой задачей проекта ALEGRO является достижение предельно

низкой энергии детектируемых фотонов (порядка 5 ГэВ) для исследования космических гаммаисточников с высокой статистикой, в особенности, быстропеременных гамма-источников (гамма-транзиентов). Проект основан на передовых технологиях высокоэффективной регистрации черенковского излучения с помощью кремниевых лавинных фотодетекторов, разработанных в ФТИ.

В рамках проекта ALEGRO в ФТИ разрабатываются новые кремниевые фотонные счетчики с высокой квантовой эффективностью, создан прототип оптической камеры для установки в фокусе телескопа. оснащенный оригинальной быстрой системой считывания и первичной обработки данных. Зеркала для телескопов ALEGRO изготавливают партнеры ФТИ из академии наук республики Армения. Будет осуществлен монтаж четырех чаш телескопов с диаметром около 30 м в вершинах ромба со сторонами 50-100 м. Площадь собирающей поверхности одной чаши составит около 800 кв. м, что почти вдвое превышает суммарную площадь таких современных систем гамма-телескопов как H.E.S.S. (ЕС, ЮАР, Намибия) и VERITAS (США, Канада, Ирландия, Англия). Телескопы перспективного высокочувствительного проекта по созданию массива черенковских телескопов «СТА» будут иметь более высокий порог регистрации гамма-квантов, что уменьшает возможности получения высокой статистики фотонов. Общая площадь собирающей поверхности ALEGRO составит более 3000 кв. м. Телескопы планируется установить на высоте 4-5 км над уровнем моря, на плато Шажнантор в Аргентинских Андах. В совокупности, указанные параметры телескопа ALEGRO позволят совершить качественный скачок в исследованиях космических источников с экстремальным выделением энергии.

В рамках проекта выполнено массированное моделирование широких атмосферных ливней, вызванных попаданием гамма-квантов различных энергий и направлений в атмосферу Земли, а также моделирование распространения черенковских фотонов в атмосфере и в оптической системе телескопа ALEGRO [1, 3]. Исследованы параметры космических объектов, которые могут быть наблюдаемы наземными черенковскими телескопами как гамма-источники в диапазоне 5 ГэВ – 10 ТэВ: остатков сверхновых звезд и сверхкаверн, гамма-пульсаров и пульсарных туманностей, микроквазаров, активных ядер галактик, источников



Рис. 1. Широкий атмосферный ливень и его оптическое излучение, наблюдаемое наземной стереоскопической системой черенковского гамма-телескопа.

гамма-всплесков, структур темной материи [1, 4, 5].

На основе многолетнего опыта ФТИ в области физики и технологии полупроводниковых структур, разработаны уникальные кремниевые фотодетекторы (многопиксельные лавинные фотодиоды), обладающие высокой чувствительностью в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне спектра [1, 2, 4]. Создан прототип оптической камеры черенковского гамма-телескопа, разработано специализированное программное обеспечение для обработки и анализа данных телескопа ALEGRO [1].

Ожидаемое энергетическое разрешение обсерватории ALEGRO составляет ∆Е/Е ~ 0.8 на энергии 5 ГэВ и ∆Е/Е ~ 0.2 на энергии 100 ГэВ. Путем выбора критериев отбора анализируемых изображений может быть достигнуто угловое разрешение 0.16 градуса на энергии 20 ГэВ при малых зенитных углах наблюдения. Чувствительность обсерватории ALEGRO в диапазоне 5-100 ГэВ может составлять 10⁻¹¹−10⁻¹²ТэВ см⁻²с⁻¹.

В результате, в рамках проекта ALEGRO будет построен уникальный высокогорный черенковский гамма-телескоп с низким порогом энергий первичных квантов для наблюдения космических гамма-источников с чувствительностью более чем в 1000 раз превосходящей орбитальный телескопы Fermi (NASA 2009). Инновационные технологии сверхчувствительного детектирования на высокогорных телескопах позволят впервые получить спектры и кривые блеска гамма-всплесков и гамма-излучения от релятивистских истечений (джетов) сверхмассивных черных дыр, блазаров, остатков сверхновых и других экзотических астрофизических объектов с экстремальным энерговыделением. Рекордная чувствительность телескопа в диапазоне энергий 10–1000 ГэВ позволит осуществлять поиск продуктов распада темной материи, исследование природы которой является одной из наиболее фундаментальных проблем современной космологии и физики элементарных частиц. Разработанные в рамках проекта ALEGRO технологии чувствительного детектирования и созданная элементная база (кремниевые фотодетекторы) могут быть также использованы для диагностики высокотемпературной плазмы, для высокотехнологичных неинвазивных медицинских исследований и многих других областях.

Публикации

- Черенковские гамма-телескопы: прошлое, настоящее, будущее. Проект А.Е. RO, А.М. Быков, Ф.А. Агаронян, А.М. Красильщиков, Е.Е. Холупенко, П.Н. Аруев, Д.А. Байко, А.А. Богданов, Г.И. Васильев, В.В. Забродский, С.В. Троицкий, Ю.В. Тубольцев, А.А. Кожберов, К.П. Левенфиш, Ю.В. Чичагов, Журнал технической физики, т. 87, вып. 6, с. 803-821, 2017.
- SiPM prototype for direct VUV registration, V. Zabrodskii,;
 P. Aruev; V. Belik; B. Ber; V. Filimonov; E. Kholupenko; D. Kirilenko; A. Krassilchtchikov; A. Nikolaev; E. Sherstnev;
 A. Vasil'ev, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., v.787, pp. 348-352, 2015.
- Регистрация ультрафиолетового излучения широких атмосферных ливней: перспективы для черенковской гамма-астрономии,
 Е. Е. Холупенко, А. М. Быков, Ф. А. Агаронян, Г. И. Васильев,
 А. М. Красильщиков, П. Н. Аруев, В. В. Забродский, А. В. Николаев, Журнал технической физики, т. 88, вып. 11, с. 1655-1666, 2018.
- Изучение неба в гамма-диапазоне, Быков А.М., Красильщиков А.М., Холупенко Е.Е., 2016, Природа, номер 7(1211), стр. 77, 2016.
- Астрофизические объекты с экстремальным энерговыделением: наблюдения и теория, Быков А.М., Успехи физических наук, т.188, вып.8, 2018.
ФИЗИКА УТС, ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРЕНИЯ

РАБОТЫ В ФТИ ИМ. А. Ф. ИОФФЕ ПО ТЕМАТИКЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР

Базовые подразделения — лаб. Процессов атомных столкновений, лаб. Физики высокотемпературной плазмы, Циклотронная лаборатория

Работы относятся к области создания систем нового поколения диагностики плазмы с высокой надежностью работы в экстремальных условиях интенсивного радиационного фона, присутствия радиоактивного трития, наличия сильных рассеянных магнитных полей, высокой температуры, вибраций и т.д.

В работе участвует коллектив, включающий около 30-ти сотрудников ФТИ из трех лабораторий: лаборатории физики высокотемпературной плазмы, лаборатории процессов атомных столкновений и циклотронной лаборатории.

Сооружаемый во Франции с участием ЕС, России, США, Японии, Индии, Китая и Южной Кореи международный термоядерный экспериментальный реактор ИТЭР представляет собой решающий шаг в направлении освоения термоядерной энергии. Это установка типа токамак с положительным выходом термоядерной мощности масштаба 500 MBm, предназначенная для испытания основных элементов промышленной термоядерной электростанции

Нашему институту поручено в счет международных обязательств России создать и поставить на ИТЭР три приоритетных системы контроля режима реактора: систему анализа потоков атомов, испускаемых плазмой; систему томсоновского рассеяния света лазера в диверторе (дивертор — наиболее энергонапряженный элемент ИТЭРа); систему анализа потоков гамма-квантов из плазмы, возникающих в процессах ядерных реакций.

Анализ потока атомов, испускаемых плазмой на ИТЭРе

Измерение испускаемых плазмой атомов и анализ их по массе и энергии позволяет получать очень важную информацию о плазме и в частности об ее важнейшем параметре — изотопном составе термоядерного топлива, то есть смеси ионов дейтерия и трития [1]. В реакторе необходимо поддерживать изотопное отношение вблизи значения равного 1, чтобы обеспечить



Рис. 1. Общий вид реактора ИТЭР: 1 — криостат; 2 — плазменная камера; 3 — сверхпроводящие катушки магнитного поля; 4 — дивертор; 5 — бланкет для поглощения нейтронов и воспроизводства трития; 6 — «порты» для доступа в плазму диагностических систем и систем нагрева.



Рис. 2. Диагностический комплекс «Анализаторы атомов перезарядки» на ИТЭР: 1 — анализатор атомов HENPA; 2 — анализатор атомов LENPA; 3 — магнитные экраны анализаторов; 4 — вакуумный трубопровод; 5 — нейтронная защита; 6 — транспортные диагностические платформы.

наиболее эффективное термоядерное горение. Система, основанная на использовании атомных анализаторов, является практически единственной способной решить эту задачу.

Общий вид комплекса атомных анализаторов, предназначенный для измерения потоков атомов дейтерия и трития на ИТЭРе, показан на рис. 2.

Система включает два атомных анализатора [2]. Это анализатор HENPA (High Energy Neutral Particle Analyzer, 1 на рис. 2) предназначенный для регистрации атомов в диапазоне энергий 0,1 — 4 МэВ. За ним расположен анализатор LENPA (Low Energy Neutral Particle Analyzer, 2 на рис. 2), для диапазона энергий 10 — 200 кэВ.[2] Линии наблюдения обоих анализаторов проходят через общий трубопровод (4 на рис. 2), но смещены относительно друг друга на 50 мм. Поэтому анализаторы могут регистрировать потоки атомов одновременно. В атомных анализаторах ионизация входящего потока атомов осуществляется с помощью тонких углеродных пленок толщиной около 100 Å, а анализ вторичных ионов по энергии и массе - в параллельных друг другу магнитном и электрическом полях. Это дает возможность измерять соотношение потоков атомов дейтерия и трития, которое легко пересчитывается в изотопное отношение ионов.

В настоящее время заканчиваются многочисленные испытания (радиационные, магнитные, температурные, вибрационные и др.) макетов всех критических элементов диагностического комплекса атомных анализаторов для ИТЭРа. Весной 2021 года в международной организации ИТЭР во Франции состоится финальная защита проекта диагностики. После этого мы приступим к изготовлению и калибровке аппаратуры для ее последующей поставки на площадку ИТЭР.

Томсоновское рассеяние в диверторе

Дивертор это специальный отсек тороидальной камеры токамака-реактора, расположенный в ее нижней части (см. рис. 1). Благодаря специально созданной геометрии магнитного поля в дивертор направляются внешние слои плазмы. Там также накапливаются рождающиеся в результате термоядерного горения в плазме ионы гелия (т.н. "зола" этого горения), которые в плазме диффундируют наружу. Так как именно внешние слои обогащены примесями, попадающими в плазму от стенок плазменной камеры, дивертор осуществляет очистку плазмы от примесей. Поток плазмы, направленной в дивертор, падает на специальные пластины из тугоплавкого материала, которым плазма отдает свою энергию. Дивертор является наиболее



Рис. 3. Диагностический комплекс «Диагностика томсоновского рассеяния и лазерной флуоресценции» на ИТЭР: 1 — диверторные пластины; 2 лучи зондирующего лазера; 3 — диагностические модули для поддержки диагностических элементов в диверторном порту с нейтронной защитой.

энергонапряженным и потому наиболее критическим элементом реактора. Стационарный поток энергии на поверхность ~10 МВт/м² является в настоящее время предельно допустимым для всех известных материалов и систем отвода тепла. Превышение этой величины ведет к серьезной аварии. Вот почему чрезвычайно важно контролировать поток энергии, попадающий в дивертор, осуществляя тем самым защиту реактора от аварий.

Эту задачу решает создаваемая в ФТИ диагностика томсоновского рассеяния в диверторе ИТЭРа (ДТР) [3], которая использует рассеяние лазерного излучения на свободных электронах (рис. 3). Луч лазера просвечивает поток плазмы, входящий в дивертор. Оптическая система сбора света, рассеянного на электронах плазмы, собирает свет вдоль потока плазмы и передает его через оптоволоконные кабели длиной около 40 метров на 25 спектрометров, расположенных в диагностической комнате. Каждый из них измеряет абсолютную интенсивность и допплеровское уширение света. По абсолютной интенсивности собранного рассеянного света определяется плотность рассеивающих электронов, а по допплеровскому уширению спектрального контура лазерного излучения их температура. Эти данные позволяют определить плотность мощности плазменной нагрузки на диверторные пластины.

Томсоновское рассеяние в диверторе ИТЭРа будет совмещено с другой лазерной диагностикой лазерно-индуцированной флуоресценцией (ЛИФ) [4]. В этом случае используется возбуждение атомов или ионов, имеющих связанные электроны на своих оболочках. светом лазера с определенной резонансной частотой. Это возбуждение мгновенно снимается путем испускания соответствующих квантов света. Система ЛИФ использует практически ту же оптическую систему и систему регистрации, что и ДТР. Основные задачи диагностики ЛИФ в ИТЭРе – по допплеровскому уширению возбуждаемых спектральных линий определять температуру атомов гелия, а по абсолютной интенсивности — их плотность в потоке диверторной плазмы. Тем самым определяется эффективность очистки плазмы от термоядерной «золы». Это очень важно, так как «зола» охлаждает плазму за счет излучения. В целом эта комбинированная система лидирует среди диагностических систем на ИТЭРе по числу инновационных решений [5,6]. В настоящее время продолжаются изготовление макетов критических элементов системы и их испытания. Осенью 2021-го года в международной организации ИТЭР во Франции состоится финальная защита проекта системы.

Регистрация ГАММА излучения

Эта система основана на спектроскопии линий гамма-излучения, вызванного ядерными реакциями с участием ионов с энергией в несколько сотен килоэлектронвольт и более, а также на регистрации сплошного спектра тормозного гамма излучения электронов, источником которого являются ускоренные (т.н. убегающие) электроны. Эти электроны при взаимодействии с ионами плазмы вызывают интенсивное тормозное излучение в МэВ-диапазоне. Энергия пучка убегающих электронов в ИТЭРе может достигать десятков МэВ, а ток убегания – более 1 МА. Диагностика развития пучков таких ускоренных электронов путем регистрации их тормозного спектра является необходимым условием безопасной эксплуатации термоядерного реактора, т.к. при срыве разряда пучок электронов может вызвать серьезные повреждения его внутренней структуры.

Схема Гамма-спектрометра для ИТЭРа показана на рис. 4. В нем используются быстрый сцинтилляционный детектор LaBr3(Ce) и полупроводниковый HPGe спектрометр с высоким разрешением [7]. Первый предназначен для регистрации сплошного спектра, а второй — для линейчатого. С помощью электродвигателя детекторы попеременно устанавливаются на линию наблюдения. Прибор окружен бетонным нейтронным экраном и снабжен аттенюатором нейтронов LiH [8]. На входе в спектрометр расположен нейтронный счетчик HC для мониторирования потока нейтронов.

Основная задача разрабатываемого гамма-спектрометра заключается в измерении энергетического спектра альфа-частиц, рождающихся в результате термоядерных реакций в DT плазме и обеспечивающих при т ее нагрев в процессе их торможения. Измерять



Рисунок 4. Схема гамма-спектрометра для ИТЭРа.

это распределение предполагается с помощью измерения допплеровского уширения линии с энергией 4.44 МэВ, возникающей при реакции с участием бериллия (основной ожидаемой примеси в плазме на ИТЭРе) — ⁹Ве(α,пү)¹²С. Не менее важная задача – сигнализировать о появлении в плазме убегающих электронов, обеспечивая защиту реактора от аварий [9].

В настоящее время производится макетирование основных узлов гамма-спектрометра и испытания (тестирование) детекторов в условиях, приближенных к условиям измерений на ИТЭР. Весной 2021 года в международной организации ИТЭР во Франции состоится финальная защита проекта системы. Представленные диагностические системы будут поставлены заказчику — Международной организации ИТЭР в соответствии с установленными сроками. В рамках нашей «Национальной программы развития управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий» обсуждается создание подобных систем для сооружаемых и планируемых к сооружению в нашей стране крупных термоядерных установок.

Публикации

- M.P. Petrov "Passive Neutral Particle Analysis" in "Fusion Physics" IAEA, Vienna 2012, part 4.2.6 pp 393-399
- V.I.Afanasyev, F.V.Chernyshev, A.I. Kislyakov, S.S.Kozlovski, B.V.Ljublin, M.I.Mironov, A.D.Melnik, V.G.Nesenevich, M.P.Petrov, S.Ya.Petrov "Neutral Particle analysis on ITER — present status and prospects" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 621 (2010) 456–467
- Mukhin E.E., Pitts R.A., Andrew P. et al., Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER. Nucl. Fusion. 2014; 54: 043007
- Gorbunov A.V., Mukhin E.E., Berik E.B. et al. Laser-induced fluorescence for ITER divertor plasma. Fusion Eng. Des. 2017; 123(11): 695–698.
- Razdobarin A.G., Dmitriev A.M., Bazhenov A.N. et al. RF discharge for in situ mirror surface recovery in ITER. Nucl. Fusion 2015; 55: 093022.
- Mukhin E., Andrew P., Babinov N.A. et al. Hardware solutions for ITER divertor Thomson scattering, Fusion Eng. Des. 2017; 123(11): 686–689.
- 7. Gin D., Chugunov I., Shevelev A., et al., Gamma ray spectrometer

for ITER. AIP Conference Proceedings. 2014; 1612: 149.

 Чугунов И.Н., Шевелев А.Е., Гин Д.Б. и др., Испытания нейтронного аттенюатора на основе 6LiH для гамма-диагностики плазмы в токамаке JET. Приборы и техника эксперимента. 2008, № 2, с. 12-16 Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Kiptily V.G., et al., Reconstruction of distribution functions of fast ions and runaway electrons in fusion plasmas using gamma-ray spectrometry with applications to ITER. Nucl. Fusion. 2013; 53: 123004.

АНОМАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ

Базовое подразделение — лаборатория Физики высокотемпературной плазмы

В цикле работ проанализированы экспериментальные условия, при которых возможно значительное снижение порога параметрических распадных неустойчивостей при электронном циклотронном резонансном нагреве (ЭЦРН) плазмы в магнитных ловушках. Показано, что при наличии немонотонного профиля плотности плазмы возможна локализация одной или обеих дочерних волн, приводящая к подавлению потерь энергии дочерней волной из области распада и значительному увеличению эффективности ее нелинейной накачки. Последнее приводит к существенному снижению порога возбуждения нелинейных параметрических процессов, который может быть легко превзойден в современных экспериментах по ЭЦРН. Рассмотрены параметрические распады СВЧ волн необыкновенной и обыкновенной поляризации. Изучено насыщение этих первичных неустойчивостей из-за каскада вторичных распадов дочерних волн и истощения накачки. Показано, что предложенная теоретическая модель, предсказывающая аномальное поглощение более четверти мощности накачки, может объяснить, а в некоторых случаях детально описать аномальные явления, обнаруженные при ЭЦРН в различных тороидальных термоядерных установках.

ЭЦРН — это эффективный метод локального дополнительного нагрева электронной компоненты плазмы, который широко применяется в настоящее время в экспериментах на стеллараторах и в токамаках и планируется для использования в токамаке-реакторе ИТЭР как для нагрева электронов плазмы, так и для контроля и подавления неоклассической тиринг-моды. Эффективность, а значит и привлекательность, этого метода базируется на использовании надежных и эффективных генераторов, – гиротронов, – которые позволяют создавать пучки ЭЦ волн с мощностью от 100 кВт до 1 МВт в каждом. До последнего времени считалось, что традиционные методы ЭЦ нагрева плазмы является вполне рутинным, а распространение и поглощение СВЧ волн предсказуемо в деталях и описываются в рамках линейной теории распространения волн. Согласно устоявшимся представлениям, проявление нелинейных процессов, в частности параметрических распадных неустойчивостей, в ЭЦ частотном диапазоне невозможно. Однако, за последние несколько лет было получено много данных, свидетельствующих о присутствии аномальных явлений при распространении СВЧ волн в плазме тороидальных термоядерных установок. В частности, во время экспериментов по ЭЦРН в различных токамаках и стеллараторах было зарегистрировано аномальное рассеяние греющего излучения плазмой со смещением частоты вниз относительно частоты волны накачки. Кроме того, в экспериментах по ЭЦРН было обнаружена генерация групп быстрых ионов. Поскольку никаких линейных механизмов взаимодействия СВЧ волн с ионами плазмы не существует, а частота электрон-ионных столкновений была на много порядков меньше, чем обратное время СВЧ импульса, все это указывало на нелинейный характер поведения СВЧ волн в плазме. Более того, в ряде экспериментов по дополнительному нагреву наблюдалось явление нелокального переноса тепла из области ЭЦ резонанса в электронном канале. Полученные экспериментальные данные оказались в глубоком противоречии с теоретическими представлениями, развитыми ранее. Это было, с одной стороны, важной научной проблемой, решение которой требовало развития теории нелинейного взаимодействия в неоднородной магнитоактивной плазме, с другой стороны, прикладной задачей, включавшей в себя оценку возможности адекватного предсказания характера распространения и места поглощения СВЧ волн в термоядерных установках.

В ответ на возникшие проблемы с объяснением экспериментальных данных были предприняты усилия, направленные на прояснение природы этих явлений. Было отмечено, что все наблюдения аномальных явлений были выполнены в разрядах с немонотонным профилем плотности плазмы. В частности, немонотонный профиль плотности был зафиксирован в разрядах, где развивалась тиринг-неустойчивость и формировался магнитный остров. Провальный профиль плотности наблюдался при мощном центральном ЭЦРН плазмы. Основываясь на полученных экспериментальных данных, была высказана идея, что в окрестности локального максимума профиля плотности возможно возбуждение локализованных вдоль направления неоднородности дочерних волн. Конвективные потери энергии которых из области нелинейной взаимодействия в этом случае оказываются полностью



Рисунок 1. Дисперсионные кривые первой ВГ волны, сдвинутая вниз на величину волнового вектора волны накачки (синяя линия) и второй ВГ волны (красная линия). Профиль плотности (черная линия) в присутствии магнитного острова [17]. В точках пересечения красной и синей линий выполнены распадные резонансные условия.

подавленными, что обеспечивает интенсивную нелинейную накачку этих колебаний. Были рассмотрены несколько сценариев низкопороговых распадов волны накачки необыкновенной поляризации. Первый из них, позволяющий непосредственно объяснить аномальное рассеяние накачки, — распад волны накачки на излучаемую из плазмы быструю необыкновенную волну и запертую в направлении неоднородности ионную Бернштейновскую (ИБ) волну, которая представляет собой коротковолновые электростатические колебания с частотой близкой ионной циклотронной или ее гармоникам [1]. Запертые в направлении неоднородности медленные ИБ волны оказываются также локализованными и в полоидальном направлении из-за специфической неоднородности тороидального магнитного поля, возбуждаемого внешними катушками [1]. Хотя пороги возбуждения этих неустойчивостей легко могут быть превзойдены в современных экспериментах, инкремент их развития оказался мал, что не позволяет этим нелинейным процессам объяснить наблюдаемые явления.



Рисунок 2. Траектория дочерней ВГ волны на магнитной поверхности в случае, когда она нелинейно связана со второй дочерней ВГ волной в присутствии пучка СВЧ волн Гауссовской формы.

Второй сценарий, не позволяющий непосредственно объяснить эффект аномального рассеяния, связан с возбуждением волн запертых в плазме, в частности двух верхнегибридных (ВГ) волн, генерируемых в ходе двухплазмонного распада волны накачки [2]. Было показано, что в присутствии немонотонного профиля плотности плазмы возможно пленение обеих дочерних ВГ волн в области распада как в направлении неоднородности (см. дисперсионные кривые взаимодействующих волн на рис.1, построенные для условий экспериментов на токамаке TEXTOR), так и в пределах пучка накачки конечного размера (см. рис.2). Трехмерная локализация делает возможным эффективную нелинейную накачку обеих дочерних волн. Порог возбуждения этой неустойчивости (до 100 kBr) существенно ниже предсказанного в работах 80-х годов (5-6 МВт). Инкремент нарастания (более10⁸ сек⁻¹) указывает на ее исключительную опасность и возможность значительного усиление шумов ВГ волн с теплового уровня. Анализ различных механизмов насыщения первичного распада [3, 4] выявил два главных механизма, ответственных за релаксацию нелинейной системы к квазистационарному состоянию: истощение накачки

и вторичную неустойчивость дочерних волн, приводящую к возбуждению вторичных (третичных и т.д.) ВГ и ИБ волн. Каскад вторичных распадов может продолжаться до тех пор, пока генерируемая ВГ волна остается запертой в окрестности локального максимума плотности плазмы (только при распаде, приводящем к генерации таких локализованных дочерних волн, порог возбуждения неустойчивости при доступных технически мощностях нагрева может быть превзойден). Были получены уравнения, описывающие этот каскадный процесс. На рис. 3 для условий токамака TEXTOR в логарифмическом масштабе показаны результаты решения этих уравнений - эволюция энергии дочерних ВГ плазмонов в «пятне» пучка накачки при трех вторичных распадах одной из первичных дочерних ВГ волн (2, красная линия). Первый вторичный распад (3, черная линия) происходит, когда энергия первичной дочерней волны превосходит пороговое значение. Далее, энергия вторичной ВГ волны быстро нарастает. В определенный момент она распадается на третичную волну (4, зеленая линия) и т.д. В итоге, система релаксирует к квазистационарному состоянию и в пределах пучка накачки, т.е. в области распада, амплитуды







Рисунок 4. Эволюция энергии всех дочерних плазмонов в плазменном объеме.

взаимодействующих волн нелинейно поддерживаются на постоянном уровне. Однако, потери энергии дочерних волн из «пятна» пучка накачки приводят к увеличению их энергии в объеме.

На рисунке 4 показана эволюция энергии всех дочерних плазмонов в объеме плазмы. Показанная зависимость позволяет найти долю мощности накачки, нелинейно передаваемую дочерним волнам при насыщении неустойчивости. Зависимость соответствующего коэффициента аномального поглощения от мощности волны накачки приведена на рис. 5. Для условий экспериментов на токамаке TEXTOR предложенная модель предсказывает высокий уровень аномального поглощения волны накачки (до 25% мощности) за счёт возбуждения дочерних ВГ и ИБ волн. Нелинейное слияние различных дочерних ВГ волн может приводить к генерации излучения в диапазоне частот, смещенном вниз относительно частоты накачки [5].

Предложенная модель позволила с хорошей точностью воспроизвести как спектр, так и радиационную температуру излучения, измеренного в экспериментах на токамаке TEXTOR. Следует отметить, что низкочастотные дочерние ИБ волны, генерируемые при вторичной неустойчивости, могут эффективно взаимодействовать с ионами, приводя к генерации групп ускоренных частиц, наблюдавшихся в эксперименте. Нелинейно возбуждаемые ВГ волны имеют частоту, существенно отличающуюся от частоты накачки. Они поглощаются электронами совсем не там, где это предсказано в рамках представления о линейном поведении волны накачки. Отличие профиля выделения энергии от предсказанного в линейном приближении может хотя бы отчасти быть ответственно за наблюдаемое во многих экспериментах по ЭЦРН явление нелокального переноса тепла в электронном канале.

Развитая в работах [2-5] модель имеет существенное ограничение. Она требует наличия таких условий (параметров разряда), при которых возможна одновременная локализация вдоль направления неоднородности обеих дочерних волн. Однако, такое сочетание параметров является скорее исключением, нежели правилом. В общем случае при распаде волны накачки необыкновенной и обыкновенной поляризации возможно возбуждение только одной локализованной



Рисунок 5. Зависимость коэффициента аномального поглощения от мощности волны накачки. В дополнительном окне эта зависимость показана в окрестности порога (28 kBт) возбуждения неустойчивости. дочерней ВГ волны, вторая же дочерняя волна быстро покидает область распада вдоль направления неоднородности, и обеспечить ее локализацию не представляется возможным. В работах [6, 7] удалось показать как аналитически, так и численно, что запертая в направлении неоднородности ВГ волна может быть дополнительно локализована в пределах пучка накачки конечного размера. Таким образом, становится возможен универсальный сценарий низкопороговой параметрической неустойчивости. — распад волны накачки (обыкновенной и необыкновенной) на две дочерние волны, одна из которых локализованная ВГ волна, — порог возбуждения которой существенно (на два порядка) ниже, предсказанного в случае монотонного профиля плотности плазмы. Анализ насышения этих неустойчивостей с учетом таких механизмов, как истощение накачки и каскад вторичных распадов первичных дочерних волн, предпринятый в работах [8], позволил определить уровень насыщения и мощность, аномально поглощаемую дочерними волнами.

Полученные результаты развивают теоретические представления о трехволновом резонансном взаимодействии в трехмерно-неоднородной плазме и вносят вклад в теорию нелинейной трансформации волн. Они позволяют теоретически объяснить, а в некоторых случаях детально описать аномальные явления, экспериментально наблюдавшиеся при ЭЦРН в тороидальных установках, и имеют важно прикладное значение для предсказания области энерговыделения волны накачки в токамаке-реакторе ITER.

Публикации

- 1. Gusakov E. Z., Popov A. Yu. (2010) Phys. Rev. Lett. 105 115003
- Popov A. Yu., Gusakov E. Z.(2015) Plasma Phys. Control. Fusion 57 025022
- Gusakov E. Z., Popov A. Yu. (2017) Plasma Phys. Control. Fusion 59 025005
- Gusakov E. Z., Popov A. Yu. (2018) Plasma Phys. Control. Fusion 60 025001
- 5. Gusakov E. Z., Popov A. Yu. (2016) Physics of Plasmas 23 082503
- 6. Popov A. Yu. , Gusakov E. Z. (2016) Europhys. Lett. 116 45002
- 7. Gusakov E. Z., Popov A. Yu. (2018) Physics of Plasmas 25 012101
- Gusakov E. Z., Popov A. Yu. and Saveliev A. N. (2018) Physics of Plasmas 25 062106

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРАНСПОРТА В ТОКАМАКЕ ФТ-2 С ПОМОЩЬЮ УНИКАЛЬНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ДИАГНОСТИК ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ГЛОБАЛЬНОГО ГИРОКИНЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Базовое подразделение — лаборатория Физики высокотемпературной плазмы

Сотрудниками ФТИ совместно с коллегами из университета Аалто (г. Хельсинки, Финляндия) создана адекватная гирокинетическая (ГК) модель токамака ФТ-2 и впервые достигнуто всестороннее согласие предсказаний глобального моделирования омического разряда токамака с данными эксперимента по удержанию плазмы, полученными как набором стандартных токамачных диагностик, так и с помощью микроволновых диагностик обратного рассеяния, в частности, диагностики усиленного рассеяния в верхнем гибридном резонансе (Рис. 1), обладающей уникальным субмиллиметровым пространственным разрешением.



Рис. 2. Радиальное распределение скорости полоидального вращения плазмы в ГК моделировании и эксперименте.

Характеристики динамики турбулентности и аномального переноса сопоставлены на микроскопическом (спектры турбулентности), макроскопическом (профиля температуры, плотности, потенциала и коэффициентов переноса) и промежуточном (статистика и спектры зональных потоков) масштабах [1, 2]. Продемонстрирована близость измеренной и рассчитанной скоростей вращения плазмы (Рис. 2). Интенсивные колебания скорости полоидального вращения плазмы обнаружены как в слаботочном (19 кА), так и в сильноточном (32 кА) разрядах токамака ФТ-2 [3].

Подтверждена теоретически предсказанная зависимость частоты колебаний от электронной температуры и от массы иона рабочего газа (водород/ дейтерий), что позволило идентифицировать их, как геодезическую акустическую моду (ГАМ) (Рис. 3). Совпали также измеренные и расчётные значения длины волны ГАМ [2].



Рис. 3. Профили частоты ГАМ для водородного (красный) и дейтериевого (синий) разрядов в эксперименте (символы) и теории (сплошные линии).

На токамаке ФТ-2 впервые экспериментально обнаружен эффект модуляции уровня дрейфовой турбулентности на частоте геодезической акустической моды (ГАМ) [4]. Измерения частоты, длины волны и уровня ГАМ проведены с помощью корреляционной доплеровской диагностики усиленного рассеяния, основанной на одновременном измерении сигналов обратного микроволнового рассеяния из области верхнего гибридного резонанса волн, различающихся по частоте, и определении корреляционных характеристик осцилляций доплеровского частотного сдвига спектра рассеяния. Спектры дрейфовой турбулентности контролировались с помощью квадратурной рефлектометрической схемы, осуществлявшей зондирование в экваториальной области со стороны сильного магнитного поля, где колебания плотности на частоте ГАМ подавлены.

Показано, что в спектре колебаний мощности рефлектометрического сигнала присутствует линия на частоте ГАМ, более того, высокий уровень когерентности обнаружен на частоте ГАМ в кросс-корреляционном спектре сигналов Доплеровского частотного сдвига и мощности рефлектометра (Рис. 4), что указывает на модуляцию уровня дрейфовой турбулентности со стороны ГАМ.

Физической причиной модуляции турбулентности



Рис. 5. Потоки частиц и тепла в численном моделировании (в дейтерии).

под действием ГАМ является очень большой уровень неоднородности (шира) вращения плазмы, связанного с этой модой. Глобальный гирокинетический расчёт омического разряда токамака ФТ-2 подтвердил экспериментальные наблюдения и выводы и продемонстрировал сильную модуляцию потоков тепла и частиц на частоте ГАМ (Рис.5).

Микроволновые измерения и ГК расчёты показали, что амплитуда ГАМ в дейтериевых разрядах существенно (до двух раз) выше, чем в сравнимых водородных [5] (Рис. 6). Сравнительный анализ уровня турбулентности при вспышках ГАМ и между ними указал на эффект подавления и среднего уровня турбулентности, сопутствующий ГАМ. Этот эффект выражен в дейтерии сильнее, чем в водороде, где уровень ГАМ сравнительно невысок.

Эти наблюдения позволили предположить, что колебания ГАМ могут играть определённую роль в зависимости времени удержания энергии и частиц в плазме токамака от атомного числа изотопа водорода,



Рис. 6. Профили амплитуды ГАМ в эксперименте (символы) и ГК моделировании (сплошные линии).

известной уже более 30 лет, как изотопный эффект в удержании, но до сих пор не получившей своего объяснения, что не позволяет надёжно прогнозировать сценарии работы токамака-реактора ИТЭР.

На токамаке ФТ-2 с использованием высоко-локальных микроволновых диагностик и глобального



Рис. 4. Спектр когерентности сигналов Доплеровского сдвига усиленного рассеяния и мощности рефлектометра.

ГК моделирования были проведены сравнительные исследования в водородных и дейтериевых разрядах характеристик многомасштабной турбулентности, ответственной за аномальный транспорт. Показано существенное превышение амплитуды геодезической акустической моды (ГАМ) колебаний плазмы в дейтериевых разрядах, приводящее к большей модуляции уровня дрейфовой турбулентности и транспортных потоков на частоте моды. При этом, несмотря на близкий средний уровень турбулентных флуктуаций плотности в водороде и дейтерии, расчётные аномальные потоки



Рис. 7. Распределение флуктуаций плотности и МГД потока частиц.



Рис. 8. Сопоставление свечения плазмы водорода и дейтерия.

частиц в водороде оказались больше [5, 6] (Рис. 7).

В согласии с этим результатом большим в водороде оказался и источник ионов, пропорциональный измеренному свечению плазмы на частоте линии D/H-бета 6.(Puc. 8).

Публикации

- S. Leerink, V. V. Bulanin, A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, J. A. Heikkinen, S. J. Janhunen, A. B. Altukhov, L.A. Esipov, M.Yu. Kantor, T. P. Kiviniemi, T. Korpilo, D. V. Kuprienko, S. I. Lashkul, and A. V. Petrov, Multi-scale investigations of drift wave turbulence and plasma flows: Measurements and full f gyrokinetic simulations, Phys. Rev. Lett. 109, 165001 (2012).
- A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, A. B. Altukhov, E. P. Selyunin, L. A. Esipov, M.Yu. Kantor, D. V. Kouprienko, S. I. Lashkul, A.Yu. Stepanov, and F. Wagner, Spatial structure of the geodesic acoustic mode in the FT-2 tokamak by Upper Hybrid Resonance Doppler

Backscattering, Plasma Phys. Control. Fusion 55, 085017 (2013).

- E. Z. Gusakov, A. B. Altukhov, V. V. Bulanin, A. D. Gurchenko, J. A. Heikkinen, S. J. Janhunen, S. Leerink, L. A. Esipov, M. Yu. Kantor, T. P. Kiviniemi, T. Korpilo, D. V. Kouprienko, S. I. Lashkul, A. V. Petrov, and N. V. Teplova, Anomalous transport and multi-scale drift turbulence dynamics in tokamak ohmic discharge as measured by high resolution diagnostics and modeled by full-f gyrokinetic code, Plasma Phys. Control. Fusion 55, 124034 (2013).
- A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, P. Niskala, A. B. Altukhov, L.A. Esipov, T. P. Kiviniemi, D. V. Kouprienko, M.Yu. Kantor, S. I. Lashkul, S. Leerink, A.A. Perevalov, and T. Korpilo, Turbulence and anomalous tokamak transport control by Geodesic Acoustic Mode, EPL (Europhys. Lett.) 110, 55001 (2015).
- A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, P. Niskala, A. B. Altukhov, L. A. Esipov, T. P. Kiviniemi, T. Korpilo, D. V. Kouprienko, S. I. Lashkul, S. Leerink, A.A. Perevalov, and M.A. Irzak, The isotope effect in turbulent transport control by GAMs. Observation and gyrokinetic modeling, Plasma Phys. Control. Fusion 58, 044002 (2016).
- P. Niskala, A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, A. B. Altukhov, L. A. Esipov, M.Yu. Kantor, T. P. Kiviniemi, D. V. Kouprienko, T. Korpilo, S. I. Lashkul, S. Leerink, A. A. Perevalov, and R. Rochford, Gyrokinetic characterization of the isotope effect in turbulent transport at the FT-2 tokamak, Plasma Phys. Control. Fusion 59, 044010 (2017).

ДИНАМИКА LH-ПЕРЕХОДА ПРИ НАЛИЧИИ ГАМ И ПЕЛЛЕТ-ИНЖЕКЦИИ

Базовое подразделение – лаборатория Физики высокотемпературной плазмы. Исследования выполнялись в сотрудничестве с Политехническим университетом Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, и Aalto University, Espoo, Финляндия.

Согласно современным представлениям, для перехода в Н-моду (режим улучшенного удержания плазмы) необходимо создание самоподдерживающегося транспортного барьера — области, в которой подавлен аномальный перенос вследствие присутствия сильно неоднородного радиального электрического поля. В некоторых токамаках, несмотря на наличие такого поля, переход в H-моду не развивается, поэтому важной задачей является анализ возможности (или невозможности) LH-перехода. На основе экспериментальных данных и результатов гирокинетических расчетов было проведено моделирование эволюции концентрации плазмы в ТУМАН-3М и ФТ-2 при наличии колебаний ГАМ и периферийном испарении пеллеты. Для ТУМАН-3М происходит инициирование перехода при превышении порогового значения для длительности или амплитуды ГАМ. При испарении пеллеты периферийная локализация возмущения и увеличение источника за счёт облака газа, поступающего в плазму с пеллетой, приводят к LH-переходу. Для ФТ-2 ни при экспериментальных параметрах ГАМ, ни при искусственно увеличенной длительности и амплитуде вспышки ГАМ промоделировать инициирование LH-перехода не удалось. Анализ нелинейной зависимости потока частиц от градиента концентрации позволяет выявить вероятные причины наличия и отсутствия LH-перехода, и определить важную роль источника частиц в инициировании LH-перехода.

Режим улучшенного удержания в токамаке, или Н-мода, является необходимым операционным режимом термоядерных установок. Н-мода характеризуется наличием периферийного транспортного барьера — области, в которой аномальный (турбулентный) перенос подавлен. Подавление турбулентности связано с существованием сильной неоднородности (шира) радиального электрического поля. Таким образом, если возможно создать достаточно сильное неоднородное электрическое поле, возможно инициировать переход в режим улучшенного удержания (LH-переход). Это предположение многократно экспериментально подтверждалось, удавалось достигнуть Н-моды при различных внешних воздействиях, или же, при определенных условиях разряда, создать условия для спонтанного перехода в Н-моду. Тем не менее, наблюдаются экспериментальные сценарии, показывающие, что сильного шира радиального электрического поля может быть недостаточно для инициирования LH-перехода. Так, например, эксперименты на токамаке ТУ-МАН-3М показали, при очень низкой плотности даже сильное неоднородное Е, не приводит к инициированию LH-перехода, существует порог по значению среднехордовой концентрации плазмы.

Рассмотрим два сценария, в которых может наблюдаться инициирование LH-перехода. Геодезическая акустическая мода (ГАМ) создаёт сильную неоднородность радиального электрического поля и скорости вращения плазмы и таким образом влияет на аномальный перенос, контролируя уровень турбулентности [1]. Инжекция замороженных топливных пеллет создаёт локализованное возмущение источника частиц, приводящее к возмущению градиента концентрации, и за счёт охлаждения плазмы — возмущению градиента ионной температуры, которые вместе создают неоднородное радиальное электрическое поле [2].

В токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 активность ГАМ наблюдалась при помощи различных диагностик и подробно изучена. В ТУМАН-3М ГАМ существуют вблизи последней замкнутой магнитной поверхности и их поле может превосходить среднее значение величины поля [3, 4]; в ФТ-2 ГАМ существуют в широкой области около половины малого радиуса [5]. Созданное ГАМ электрическое поле в дейтериевых разрядах ФТ-2 превосходит не только среднее Ег, но также и величину поля ГАМ в ТУМАН-3М. При этом в токамаке ТУМАН-3М наблюдается LH-переход после вспышки ГАМ, а в ФТ-2 переход в Н-моду в рассмотренных сценариях с сильной активностью ГАМ не наблюдается.

Схожая ситуация имеет место в токамаке ТУ-МАН-3М в сценариях с пеллет-инжекцией — при одинаковом возмущении градиентов температуры и концентрации, и, следовательно, одинаковом возмущении радиального электрического поля, пеллета (если испаряется на периферии и сопровождается облаком газа от разрушенной в пеллетопроводе части пеллеты) может приводить к LH-переходу, или (если испаряется глубоко в плазме) вызывает только кратковременное улучшение удержания.

Для того чтобы понять механизм, ответственный за улучшение удержания и инициирование Н-моды, была использована модель эволюции концентрации и температуры.



Модель позволяет на основе начальных профилей концентрации и ионной температуры на каждом временном шаге вычислить радиальное электрическое поле и его шир, на основании величины шира определить степень модуляции коэффициента диффузии.

Температуропроводность полагалась неоклассической и не подверженной действию шира Е,. С учётом этой модуляции вычислить изменение профилей концентрации и температуры. Возмущение, связанное с ГАМ или с испарением пеллеты, закладывалось в модель максимально на основе экспериментальных данных, чтобы расчёт был приближен к наблюдаемым сценариям.

В данной модели эффект подавления турбулентности был включен посредством зависимости коэффициента диффузии от шира Е, [6]. Такая форма коэффициента диффузии требует информации об инкременте нарастания турбулентности — эта величина была получена из гирокинетического моделирования при помощи кода ELMFIRE [7]. Также моделирование при помощи ELMFIRE подтвердило мгновенный отклик коэффициента диффузии на модуляцию шира Е,.

В сценариях с ГАМ моделировались экспериментальные разряды с низкой плотностью токамака ТУ-МАН-3М и 19 кА разряд токамака ФТ-2. Для обоих токамаков профили параметров плазмы были получены из эксперимента и кода ASTRA. Параметры ГАМ были получены из эксперимента и гирокинетического моделирования. Электрическое поле ГАМ было взято в виде локализованной в пространстве и времени бегущей волны. Моделирование сценариев для ТУМАН-3М и ФТ-2 дало результаты, совпадающие с экспериментальными. В модели для ТУМАН-3М LH-переход происходит, если амплитуда или длительность вспышки ГАМ превышает определенное пороговое значение (рис. 1 a, b). Эти пороговые значения зависят от параметров плазмы (в первую очередь, ионной температуры), и более подробно рассмотрены в [8]. В модели



Рисунок 1. ГАМ в токамаках ТУМАН-3М (a, b) и ФТ-2 (c). В ТУМАН-3М вспышка большой длительности (a) или амплитуды (б) приводит к инициированию LH-перехода. В ФТ-2 ни при экспериментальных параметрах ГАМ, ни при удвоенной амплитуде и длительности вспышки LH-переход не происходит (c).

для ФТ-2, несмотря на большую величину шира Е, LH-переход не наблюдался ни при экспериментальных значения параметров ГАМ, ни при удвоенной амплитуде и длительности (рис. 1 с).

В сценариях с пеллет-инжекцией в токамаке ТУ-МАН-ЗМ параметры плазмы были взяты близкими к экспериментальным, источник частиц, связанный с пеллетой и область охлаждения плазмы были получены на основании кривой испарения пеллеты, наблюдаемой детекторами свечения линии D_α – геометрия диагностики позволяет восстановить пространственное и временное распределение источника, связанного с пеллетой. Облако газа от разрушенной части пеллеты включалось в модель как увеличение источника холодных нейтралов с периферии; в расчёте эволюции ионной температуры учитывалось адиабатическое охлаждение плазмы в области испарения и усиленная перезарядка на веществе пеллеты.

В случае с периферийным испарением (максимум на 19 см) и облаком газа происходит LH-переход (рис. 2 а); также видно, что увеличенный источник частиц играет принципиальную роль в инициировании перехода — без него только возмущение Er не способно запустить LH-переход. В случае глубокого испарения (максимум на 17 см) только твёрдой пеллеты наблюдается улучшение удержания с быстрой (менее 1 мс) деградацией к исходному состоянию (рис. 2 b).

Несмотря на то, что амплитуда возмущения градиента и коэффициента диффузии близки к эксперименту, длительность существенно короче экспериментальной. Причина этого различия заключается в том, что в модели не было учтено влияние испарения пеллеты на свойства турбулентности. Испарение пеллеты сильно изменяет свойства турбулентности за счёт увеличения частоты электронных столкновений в области испарения, и может привести к тому, что определенные моды турбулентности перестают раскачиваться – этот эффект также способствует улучшению удержания.

Как можно заметить из модели для пеллет-инжеции, источник частиц играет важную роль в инициировании LH-перехода. Этот результат находится в соответствии с современными теоретическими взглядами на существование бифуркации в уравнениях переноса, описывающей существование двух режимов удержания [9]. Для того, чтобы применить этот анализ к смоделированным случаям, необходимо проинтегрировать стационарное уравнение диффузии, что даёт: . В левой части стоит поток частиц, зависящий



Рисунок 2. Пеллет-инжекция в токамаке ТУМАН-3М: LH-переход (а) и кратковременное улучшение удержания (б)

Физика УТС, плазмы и электромагнитного ускорения



Рисунок 3. N-образные кривые для ГАМ (a, b) и пеллет-инжекции (c, d)

от градиента концентрации, в правой части — интегральный источник частиц. С учётом зависимости от градиента концентрации, форма потока нелинейная (т.н. N-образная кривая) и содержит три участка — два с положительной производной, относящиеся к стабильным решениям для L – и H-моды, и нестабильный участок с отрицательной производной, который делает возможной бифуркацию потока частиц. Пересечения N-образной кривой и горизонтальной линии, отвечающей интегральному источнику, определяет существование режимов удержания.

Рисунки 3 а) и b) показывают N-образные кривые для инициированного ГАМ LH-перехода в ТУМАН-3М и ФТ-2; рисунки 3 с) и d) относится к пеллет-инжекции в ТУМАН-3М.

Результаты моделирования вкупе с теорией, описывающей возможность LH-перехода, показывают, что только сильное неоднородное радиальное электрическое поле может оказаться недостаточным для инициирования LH-перехода — источник частиц играет существенную роль в определении возможности существования H-моды.

Публикации

- 1. Hallatschek K. and Biskamp D. 2001 Phys. Rev. Lett. 86 1223
- 2. Gohil P. et al. 2001 Phys. Rev. Lett. 86 644
- 3. Bulanin V.V. et al 2016 Plasma Phys. Control. Fusion 58 045006
- 4. Askinazi L.G. et al 2012 Tech. Phys. Lett. 38 6
- 5. Gurchenko A D et al 2013 Plasma Phys. Control. Fusion 55 085017
- 6. Staebler G.M., 1998 Plasma Phys. Control. Fusion 40 569-580
- Kiviniemi T.P. et al 2016 43 EPS Conf. on Plasma Physics (Leuven, 2016) P2.059
- Askinazi L.G., Belokurov A.A. et al 2017 Plasma Phys. Control. Fusion 59 014037
- 9. Malkov M.A. and Diamond P.H. 2008 Phys. Plasmas 15 122301

СПЕКТР ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ТУМАН-ЗМ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Базовые подразделения:

лаб. Физики высокотемпературной плазмы,

лаб. Процессов атомных столкновений,

Циклотронная лаборатория в сотрудничестве с СПБГПУ, Санкт-Петербург

Ионный циклотронный резонанс (ИЦР) является фундаментальным явлением, играющим важную роль во многих процессах в магнитоактивной плазме. В основе его лежит явление вращения иона с зарядом q и массой mi в магнитном поле с индукцией В с угловой частотой w,=qB/m, называемой ионной циклотронной частотой. Электромагнитная волна, направленная в плазму извне и имеющая частоту, близкую к ионной циклотронной, может поглотиться в плазме и передать ей свою энергию. Это явление широко применяется в качестве метода дополнительного нагрева плазмы. Возможен и обратный процесс — излучение плазмой энергии в виде плазменной волны на частоте ИЦР. При этом, в отличие от электронного циклотронного излучения, ионное циклотронное излучение (ИЦИ) порождается не отдельными независимо излучающими заряженными частицами, но является результатом развития в плазме неустойчивости на частотах, близких к частотам гармоник ИЦР.

Обычно, в токамаках ИЦИ порождается быстрыми ионами (БИ), возникающими в результате термоядерных реакций и/или применения дополнительного нагрева — инжекции энергичных нейтральных атомов или высокочастотного с помощью волн ИЦР диапазона. В этом случае ИЦИ может нести информацию о параметрах БИ. В экспериментах на ТУМАНе-3М ИЦИ наблюдалось и в отсутствие БИ — в режиме омического нагрева [1].

В статье представлены результаты исследования

ИЦИ в ТУМАНе-ЗМ при инжекционном нагреве плазмы. Инжекция атомарного пучка с энергией до 20 кэВ, состоящего из 60% дейтерия и 40% водорода осуществлялась в тангенциальном направлении по току плазмы [1,2]. ИЦИ из плазмы регистрировалось с помощью массива из 16 внутрикамерных электромагнитных зондов, снабженных усилителями и АЦП с частотой дискретизации до 250 МГц [2]. Спектрограмма ИЦИ в типичном разряде с инжекционным нагревом приведена на рис. 1а. Линия ИЦИ (МГц) в таком эксперименте обычно имеет довольно сложную структуру,



Рисунок 1. (а) сверху вниз: тороидальное магнитное поле, плазменный ток, плотность, спектрограмма ИЦИ при инжекционном нагреве (в интервале времени t = 50-70 мс); (b) распределение частоты ИЦР водорода и дейтерия по сечению плазмы для поля B₀(t=60мc) = 0.89 Тл; (c) спектр ИЦИ в интервале времени t=61.45-61.55 мс.

состоящую из одной или нескольких узких линий, отстоящих друг от друга на неравные промежутки величиной 100-300 kHz. На этом же рисунке хорошо видны линии, соответствующие ИЦИ в омическом режиме, вблизи частоты ~8 МГц (в момент времени t=45 мс) и ее гармоник, вплоть до девятой. Это излучение появляется еще до включения инжекционного нагрева, продолжается после его выключения, и слабо подвержено его влиянию. Частота обоих типов ИЦИ — омического и при инжекционном нагреве — изменяется во времени пропорционально изменению тороидального магнитного поля и не зависит от плотности плазмы. На рис. 1с показан спектр ИЦИ, на котором хорошо видны как линии, соответствующие ИЦИ, вызванному инжекционным нагревом (f1, f2 и гармоники), так и линии гармоник омического ИЦИ с частотой F^{OH}~ 8.25 MHz, (линии 2F^{OH}, 3F^{OH}, 4F^{OH}).

Характерной особенностью наблюдаемого при инжекционном нагреве излучения является то, что частота ИЦИ обычно, за исключением единичных разрядов, соответствует частоте ИЦР ионов малой добавки: водорода в дейтериевой плазме, и дейтерия — в водородной. В отличие от большинства других экспериментов, частота ИЦИ, наблюдаемого в обсуждаемых экспериментах, соответствует ИЦР в центральной области плазмы, вблизи R ~ 0.6 m, см. рис. 1b. На большинстве других токамаков ИЦИ возникает в периферийной области плазмы вблизи экватора. Поэтому существующие модели ИЦИ требуют доработки для анализа экспериментов на ТУМАНе-3М. В нашем случае наиболее вероятным механизмом генерации ИЦИ является возбуждение неустойчивости быстрыми ионами, рожденными при ионизации атомарного пучка вблизи магнитной оси токамака. Такая неустойчивость возникает вследствие немонотонности функции распределения ионов. Условие сдвинутого с учетом эффекта Доплера резонанса между І-ой гармоникой циклотронной частоты быстрого иона ω_{ci} , движущегося со скоростью v, и волной с частотой ω и волновым

вектором k, может быть представлено в виде [3]:

$$\omega = \omega_{ci} + v_b k_{(\parallel)} + v_D k_{\perp}, \qquad (1)$$

где k_{\parallel} и k_{\perp} — составляющие волнового вектора вдоль и поперек магнитного поля **В**, $v_{\rm b}$ и $v_{\rm D}$ — продольная скорость БИ и скорость его магнитного дрейфа, соответственно,

$$V_{D} = \frac{V_{\perp}^{2} / 2 + V_{\parallel}^{2}}{\omega_{ci}} \left[B \times \frac{\nabla B}{B^{2}} \right]$$

В зависимости от траектории движения быстрого иона в магнитном поле соотношение между v_b , и v_D , а значит и сдвиг между наблюдаемой частотой ИЦИ ω и гармониками циклотронной частоты lw_{cl} быстрого иона, может быть различным. При этом особый интерес, с точки зрения эффективного взаимодействия БИ с волной, представляют траектории, на которых БИ в течение длительного времени находятся на участках, локализованных вблизи выделенных значений большого радиуса R, таких, на которых частота ИЦР $w_{cl} = (q/m) B_0 R_0 / R (q - заряд БИ, m - его масса, <math>B_0$ - магнитное поле в центре камеры, R_0 - большой радиус камеры) оказывается близка к частоте наблюдаемого ИЦИ.



Рисунок 2. Траектории удерживаемых БИ в зависимости от положения точки ионизации (см. текст): 1 — траектория пролетного БИ, 2 –стагнирующая (вблизи R = 0.58 m) траектория, 3 — запертая картофелеобразная траектория (с прямолинейным участком вблизи R = 0.52 m), 4 — банановая траектория запертого БИ.

На рис. 2 приведены характерные примеры траекторий различных БИ в проекции на полоидальное сечение токамака. Траектории получены в результате численного решения уравнения движения БИ с энергией, соответствующей энергии атомарного нагревного пучка, в реалистичных магнитных полях (тороидальном и полоидальном) для следующих параметров: $B_{_0} = 1 T \pi$, ток плазмы $I_{_n} = 134 \kappa A$, энергия БИ водорода $E_{0} = 19 \, \kappa_{3} B$. В качестве начального условия задавалось положение точки ионизации вдоль линии инжекции, определяемое величиной x = 2h/L, где L — максимально возможная длина траектории атомарного пучка в плазме, *h* — расстояние от точки ионизации до точки максимального приближения атомарного пучка к главной оси тора. Траектория 1 соответствует x = 0.2. т.е. рождению быстрого иона в точке, расположенной между магнитной осью разряда и внутренней стенкой камеры. При этом быстрый ион захватывается на пролетную траекторию с большим радиусом дрейфовой поверхности, и выделенные (в указанном выше смысле) значения ИЦР на такой траектории отсутствуют. Траектория 4 — «банановая траектория» запертого БИ, родившегося на периферии (x = 0.85). Вблизи точек остановки такой БИ проводит относительно большую долю своего баунс-периода, и в принципе, может эффективно возбуждать ИЦ-неустойчивость, приводящую к генерации ИЦИ. Особый случай банановой траектории — т.н. «картофелевидные» траектории типа 3 (x = 0.78) — еще более «выгоден» с точки зрения возбуждения плазменной неустойчивости, поскольку на вертикальном участке траектории БИ проводит почти 90% времени баунс-периода. Однако с учетом того, что циклотронная частота БИ в точках остановок траекторий 3 и 4 не равна наблюдаемой частоте ИЦИ, доплеровское слагаемое в выражении (1) $k_1 v_2 \neq 0$, т.е. возбуждаемая в плазме волна должна иметь определенное ненулевое значение k_{i} , а значит, измеряемое магнитными зондами распределение интенсивности ИЦИ должно быть несимметрично относительно

экваториальной плоскости. Этого не наблюдается в эксперименте.

Наиболее эффективными, с точки зрения взаимодействия БИ с возбуждаемой в плазме волной, представляются пролетные траектории типа 2 (x = 0.58), на которых частицы все время локализованы вблизи определенного значения большого радиуса. Такие траектории известны как «стагнирующие» — stagnation orbits. Расчет показывает, что для таких частиц кинетическая энергия примерно поровну распределена между продольной и поперечной компонентами, при этом v_n/v_b << 1 и вкладом дрейфового слагаемого в доплеровское условие резонанса (1) можно пренебречь [3]. Сравнивая измеренную частоту ИЦИ $f_{iaa} = \omega/2\pi =$ 12.8 MHz (наблюдаемую при инжекции Н пучка с энергией 19 keV в D плазму с тороидальным полем 0,93 Тл) и первую гармонику циклотронной частоты для БИ на стагнирующей орбите $f_{so} = w_c/2\pi = 13.3$ MHz, из (1) можно получить оценку тороидального модового числа $n = Rk_{\parallel} \approx -1$. Отрицательное значение тороидального модового числа указывает на распространение волны навстречу инжектируемому пучку (и току плазмы). Такое «контр-распространение» было обнаружено также





на токамаке MAST [3].

Условие доплеровского резонанса между БИ, захваченными на стагнирующие оорбиты, и волной в плазме может быть использовано и для объяснения тонкой структуры спектральной линии ИЦИ. Расчеты показали, что радиус локализации стагнирующих траеторий R слабо зависит от энергии БИ: при уменьшении энергии БИ точка локализации смещается в направлении уменьшения большого радиуса R_{...}, а соответствующая ионно-циклотронная частота ω_{a} увеличивается. Согласно измерениям спектр инжектируемого H/D атомарного пучка не является моноэнегетическим, он содержит, помимо основной компоненты с энергией E_{a} , так же и компоненты с энергиями $E_{a}/2$, $E_{a}/3$, $E_{a}/18$, и др. Наличие этих энергетических компонент связано с ускорением в тракте инжектора молекулярных ионов типа H_{2}^{+} , H_{3}^{+} , D_{2}^{+} , D_{3}^{+} , HD^{+} , $H_{2}O^{+}$, HDO^{+} , и др. и их последующей диссоциацией и нейтрализацией. Поскольку точки локализации стагнирующих траекторий для таких БИ различны, различаются и их циклотронные частоты, см. пример для случая ИЦИ водорода в дейтериевой плазме, приведенный на рис. 3. При этом качественно, с учетом доплеровского сдвига, картина

спектра циклотронных часот повторяет тонкую структуру линии ИЦИ водорода. Интересно отметить, что при наблюдении ИЦИ на частоте дейтерия в водородной плазме расщепление линий гораздо меньше, что качественно согласуется с результатами моделирования, которое показывает, что стагнирующие траектории для дейтронов с энергиями $E_{0}/2$, $3E_{0}/3$, $E_{0}/20$ находятся ближе друг к другу, чем для протонов [4].

Данное объяснение тонкой структуры линии ИЦИ не является единственным. Ранее предлагалось альтернативное объяснение наблюдаемых спектров на основе представлений о существовании пространственного резонанса, возникающего в результате модуляции диэлектрической проницаемости в тороидальном направлении. Такая модуляция может быть обусловлена вырождением траекторий БИ при выполнении определенного соотношения между продольной и поперечной скоростями БИ на стагнирующих траекториях [1]:

$$\frac{2\pi R}{V_{\parallel}} = n' \frac{2\pi \rho_i}{V_{\perp}} \tag{2}$$

где n'-число экстремумов модуляции є в тороидальном





Физика УТС, плазмы и электромагнитного ускорения

направлении, равное ~ 50 в рассматриваемом случае, *ρi* — *ларморовский радиус БИ*.

Интересной особенностью спектров ИЦИ при нижекционном нагреве является изменение их тонкой структуры под воздействием пилообразных колебаний, см. рис. 4а и b. Как видно из рис. 4b, отдельные спектральные компоненты изменяют свою интенсивность синхронно с пилообразными колебаниями. По-видимому, это связано с тем, что возмущения магнитной структуры внутри области q=1 во время пилообразных колебаний приводят к изменению локализации стагнирующих орбит или, возможно, к потерям БИ, ответственных за возбуждение различных спектральных составляющих.

Таким образом, в данной работе предложено объяснение центрального расположения области генерации ИЦИ, наблюдаемого при инжекционном нагреве в токамаке ТУМАН-ЗМ. Источником свободной энергии, для неустойчивости, ответственной за генерацию ИЦИ, согласно предложенной модели, являются пролетные БИ, локализованные на стагнирующих траекториях. Представлены модели для объяснения тонкой структуры наблюдаемого ИЦИ: (1) генерация отдельных линий при возбуждении неустойчивости быстрыми ионами с различной энергией, (2) расщепление спектра за счет различной пространственной локализации вырожденных траекторий вблизи стагнирующих орбит.

Публикации

- 1. S.V. Lebedev et al, EPJ Web of Conf. 149(2017), 03010
- 2. L.G. Askinazi et al, Nuclear Fusion, 58(2018), 082003
- 3. S. E. Sharapov et al, Physics of Plasmas, 21(2014), 082501
- L.G. Askinazi et al, 45th EPS Conference on Plasma Physics. Prague: ECA45A(2018), P5.1084

ВАКУУМНАЯ ДУГА В КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ

Базовое подразделение — лаборатория Физики низкотемпературной плазмы

Вакуумная дуга (ВД) — это самостоятельный электрический разряд, поджигаемый в вакууме (давление остаточных газов р≤10⁴Ра), и горящий в эрозионных парах материала электродов. В этом отличие ВД от дуг, горящих в газовой среде, для которых эрозия электродов не является обязательным условием существования дуги. Из сказанного следует, что состояние ВД определяют процессы на электродах. Физические основы исследований ВД были заложены в 1970 — 1980-ых годах, когда под руководством В.Г. Юрьева в лаборатории активно исследовались процессы на электродах и в приэлектродной плазме сильноточных разрядов. Большой вклад в эти работы внесли Г.А. Дюжев и Ф.Г. Бакшт. Начиная с 1990-ых годов, под руководством С.М. Школьника проводятся исследования непосредственно ВД с интегрально холодным катодом (охлаждаемый катод или импульсное питание дуги). Основные методы диагностики – спектроскопия, в том числе высокой разрешающей силы, и визуализация быстрых процессов с помощью высокоскоростной фотосъёмки, а также электрические зонды.

ВД наиболее сложный и наименее изученный объект среди электрических разрядов. ВД имеют разнообразные применения в промышленности и электроэнергетике. Слаботочные ВД (~ 10²А) используются для нанесения покрытий и в микроэлектронике. Сильноточные ВД (синусоидальный ток до 10⁵А, *f*=50Гц) — в вакуумной коммутационной аппаратуре для высоковольтных промышленных энергосетей переменного тока. Широкое распространение вакуумных коммутационных аппаратов объясняется их высоким эксплуатационным ресурсом и малыми весогабаритными показателями. Они экологически безопасны. Совершенствование конструкций, улучшение эксплуатационных характеристик и создание аппаратов высоковольтного класса (до 145кВ) требует дальнейшего развития физических исследований, интерес к которым велик во всём мире.

Привязка ВД к холодному катоду состоит из нестационарных (время жизни ~10⁻⁵s) микро привязок (радиус~10-4 cm) — катодных пятен (КП). Через КП может протекать ток от единиц Ампер до десятков Ампер. При увеличении тока КП делится. Для каждого металла существует некоторый средний ток І, пропускаемый КП. Плотность тока в КП достигает 10⁸A/cm², а плотность потока энергии — 10⁹W/cm². Поэтому КП является источником сверхзвукового потока (скорость ≥10⁶ cm/s) плотной полностью ионизованной эрозионной плазмы. Эта плазма необходима для существования ВД. За время действия импульса питания из-за малого времени жизни КП успевает много раз отмереть и вновь появиться в другом месте, хаотически перемещаясь по катоду. Если приложено тангенциальное магнитное поле В, движение КП упорядочивается, и КП движется в направлении, противоположном тому, в котором на протекающий в КП ток действует сила Ампера. Это движение называют ретроградным. Если приложено



Рисунок 1. Движение КП по поверхности катода (схема).

магнитное поле *B*, наклонное к поверхности катода (угол *φ*, рис.1), направление движения КП меняется. Оно движется под углом *θ*, называемым углом Робсона, относительно ретроградного направления.

Слаботочными называют дуги, в которых на катоде одновременно существует одно или несколько КП.



Рисунок 2. Средний ток КП в наклонном магнитном поле

Такие дуги являются удобным объектом для исследования зависимости характеристик КП и плазменной струи, выбрасываемой из КП, от магнитного поля. В лаборатории были выполнены исследования с катодами из меди и тугоплавких металлов [1], а также из композиции медь-хром (CuCr), которая в настоящее время широко используется для электродов в вакуумных коммутационных аппаратах. Накоплен большой справочный материал, обнаружены ранее неизвестные закономерности. Впервые показано, что скорость движения КП зависит только от В, и не зависит от В, т.е. не зависит от угла наклона магнитного поля. Наоборот, средний ток, пропускаемый пятном І, практически не зависит от амплитудного значения поля В (рис.2), если угол наклона поля ϕ больше критической величины φ_{crit} (CuCr, φ_{crit} =45°; медь, φ_{crit} =63°). Обнаружено, что соотношение между углом наклона поля и углом Робсона определяется не материалом, как это считалось ранее, а длиной дуги [2].

С помощью спектроскопических измерений с



высоким временным и пространственным разрешением было обнаружено, что в промежутке дуги существует канал полностью ионизованной плазмы, окруженный «шубой» из слабоионизованной плазмы, поперечный размер которой значительно превосходит поперечный размер канала. В свободногорящей дуге канал имеет форму конуса с углом при вершине ~100°, опирающегося на КП. Под действием нормального магнитного поля *B*_л≥0.05T на расстоянии *z*~1mm от катода канал приобретает цилиндрическую форму (рис.3). Эти результаты согласуются с результатами современных теоретических расчётов. Наклонное к поверхности магнитное поле с индукцией *B*~0.1T



приводит к искривлению канала. Плазменная струя, выбрасываемая из КП по нормали к поверхности катода, на малом расстоянии (~1mm) разворачивается и далее распространяется по направлению магнитного поля [3].

Спектроскопические измерения высокой разрешающей силы с высоким временным и пространственным разрешением позволили получить фундаментальный результат. Впервые было экспериментально доказано, что в плазме ВД существует две группы ионов, слабо взаимодействующие друг с другом: быстрые ионы (энергия ~10²eV), источником которых является КП, и медленные ионы (температура ≈4-5eV), источником которых является анод. Медленные ионы образуют-



Рисунок 5. Кадр высокоскоростной съёмки поверхности катода. Катод внизу. Экспозиция 25µs, I=45.4kA

ся при ионизации атомов, эмитированных анодом под действием быстрых катодных ионов, т.е. в результате распыления поверхности анода. На рис. 4 приведены контуры спектральных линий ионов, математическая обработка которых позволила получить указанный результат. Анод является дополнительным источником плазмообразующего вещества, что обеспечивает устойчивость горения ВД. Как видно, в ВД существует взаимосвязь катодных и анодных процессов.

Исследования слаботочных ВД заложили основу для развития физики сильноточных ВД, и позволили создать базу данных характеристик КП, необходимую для моделирования сильноточных ВД. Эти данные широко используются в различных работах, что отражает высокая цитируемость публикаций лаборатории.

В сильноточных ВД одновременно горят сотни и



Рисунок 6. ВДК в разрезе (схема)

даже тысячи КП (рис. 5). Как уже было сказано, основная область использования сильноточных ВД — вакуумная коммутационная аппаратура. Разработка надёжных и дешёвых аппаратов для высоковольтных энергосетей столь масштабная задача, что она на долгие годы определила направление физических исследований сильноточных ВД.

Основной элемент коммутационного аппарата вакуумная дугогасительная камера (ВДК) (рис.6). Принцип работы ВДК следующий. В некоторый момент времени привод размыкает электроды и в ВДК загорается удлиняющаяся дуга. При переходе переменного тока через ноль дуга гаснет и в промежутке начинает восстанавливаться вакуум, электропрочность промежутка растёт. После нуля тока на электродах начинает восстанавливаться высокое напряжение, которое есть в сети. Если до восстановления напряжения электропрочность успеет достаточно вырасти — выключатель сработал. Если нет — произойдёт повторный пробой и опять загорится дуга. Пробой произойдёт, если при горении дуги она перейдёт в контрагированные моды горения, когда дуга на одном или обоих электродах привязывается к малой области.

Контрагированная дуга плавит место привязки к электроду и сильно перегревает расплав. К моменту, когда ток проходит через ноль и восстанавливается высокое напряжение, место привязки не успевает остыть и «парит». Пары электрода препятствует восстановлению электропрочности промежутка, и отключения тока не происходит. Поэтому основная задача физических исследований сильноточных ВД — выяснение причин перехода дуги в контрагированную моду и разработка способов увеличения тока, при котором происходит переход.

С учётом выше сказанного, основной объект физических исследований — сильноточная ВД в электродной системе, имеющей геометрию, характерную для ВДК: *h/D*<<1 (*h*≤10mm — длина дуги, *D*~(50-60) mm — диаметр электродов), при питании дуги полуволной тока (*f*=50Hz) амплитудой до 100кА. Дуга поджигается размыканием электродов. Скорость движения подвижного электрода ~1m/s. Исследования при столь больших токах необходимы, т.к. помимо номинального тока (1 — 3kA), ВДК должна быть способна отключить ток короткого замыкания сети. Выделяющаяся в ВДК мощность при отключении тока короткого замыкания достигает *W*~5·10⁶W. Коммутация такой большой мощности возможна только при оптимальном воздействии на дугу магнитными полями.

Для разработки эффективных способов воздействия на дугу магнитным полем необходимо понимать процессы в свободногорящих дугах. Однако даже свободногорящая ВД в описанных выше условиях – это очень сложный объект, т.к. после поджига развитие (расширение из точки поджига) дуги происходит при меняющихся токе и межэлектродном промежутке. Дуга после поджига как бы движется по некоторой «траектории» в плоскости (*h* – *l*), переходя из одной моды горения в другую (примеры «траекторий» (штриховые



Рисунок 7. Моды горения дуги (схема). І — диффузная, II, III, IV — контрагированные.

линии) при разных амплитудах тока *I*_o и моментах поджига дуги (различных токах поджига *I*_{ig}) приведены на рис. 7; там же приведены границы мод (сплошные линии), известные из литературы). Долгое время не удавалось распутать клубок, в котором переплетены зависимости параметров дуги от времени, тока и длины. Пришлось упростить задачу. Вначале изучить различные функциональные зависимости раздельно, а потом сложить полученные знания и разработать модель реального процесса.

Поэтому в лаборатории работу начинали с изучения развития дуги фиксированной (но варьируемой) длины, питаемой прямоугольным импульсом тока варьируемой амплитуды. В этих работах было показано, что развитие и последующее изменение мод горения сильноточной ВД определяется динамикой катодной привязки, т.е. динамикой множества КП, которые взаимодействуют собственными магнитными полями, генерируемыми текущими через них токами. Обнаружено, что динамика КП также связана с процессами на аноде (физическая причина этой связи была изучена при работе со слаботочными ВД).

Результаты этих работ позволили впервые объяснить причины переходов между модами [4]. Этот результат чрезвычайно важен. т.к. во всех модах. кроме одной, называемой «диффузной» модой (мода I, рис.7), дуга контрагирована, что препятствует отключению после нуля тока. Отключение возможно, только если «траектория» сильноточной ВД полностью лежит в диффузной моде. Понимая причины междумодовых переходов. можно найти способы продвинуть границы диффузной моды в область больших токов, а значит, увеличить отключаемый ток. Действительно, поскольку развитие сильноточной ВД и междумодовые переходы определяются динамикой КП, на которую, как показали наши работы, можно влиять, накладывая на дугу внешнее магнитное поле, то очевидно, что внешним магнитным полем можно влиять на положение границ между модами. На рис.7 показан результат воздействия однородного аксиального магнитного поля (АМП) на сильноточную ВД. Видно, что под действием однородного АМП граница диффузной моды смещается в сторону больших токов (новая граница штрих-пунктир). Этот результат был известен ранее, но объяснение его не существовало.



экономически



Физика УТС, плазмы и электромагнитного ускорения

Однако

создать

приемлемую

конструкцию коммутационного аппарата с внешним однородным полем (дугогасительная камера внутри катушек, питаемых от отдельного источника) невозможно, потому для создания АМП приходится использовать сам коммутируемый ток, заставляя его сделать разворот на 270-300 градусов вокруг оси электродной системы. Разворот тока происходит при его протекании через так называемую электродную розетку (разрезанный наискось цилиндр), на которую напаяна электродная накладка. Такие электроды называют АМП-электродами. Они генерируют значительные аксиальные поля (~5 – 10 mT/kA). Принципиальным недостатком является неоднородность генерируемого ими АМП и фазовый сдвиг между полем и током в дуге.

Поэтому исследовалось воздействие неоднородных АМП различной конфигурации на сильноточную ВД. Исследования велись в тесном взаимодействии с основным разработчиком и производителем вакуумного коммутационного оборудования в РФ — Промышленной группой (ПГ) Таврида Электрик. Исследования позволили инженерам ПГ модернизировать существующие АМП-электроды. В модернизированных АМП-электродах дуга горела без контракции при значительно бОльших токах. Кроме того, удалось разработать новую конструкцию АМП-электродов, в которой вся рабочая поверхность электродов загружена током (а, значит, и тепловым потоком) практически однородно (рис.8). Это позволяет существенно увеличить отключаемый ток, сохранив и даже уменьшив весогабаритные показатели ВДК.

В последние два года в лаборатории исследуются процессы на поверхности электродов при предельных (50-100kA) отключаемых токах. Разработана методика определения температуры поверхностей электродов в нуле тока с высоким временным и пространственным разрешением. Обнаружено, что динамика расплава на поверхности электродов существенно влияет на отключающую способность АМП-электродов Предложено новое объяснение повторного пробоя [5]. Полученные результаты указывают новые пути увеличения плотности отключаемого тока.

Публикации

- A. M. Chaly, Yu.A. Barinov, V.S. Minaev, S.U. Myatovich, K. K. Zabello, S. M. Shkol'nik, "Characteristics of vacuum arc cathode spots on the refractory metal electrodes", I.E. Trans. Plas. Sci., 2013, v.41, no.8, part II, pp.1917-1922.
- К. К. Забелло, А. М. Чалый, С. М. Школьник, «Измерение угла Робсона в вакуумных дугах различной длины», ПЖТФ, 2013, Т.39, В.2, С.44-51.
- K. K. Zabello, S. U. Myatovich, A.A. Logatchev, S. M. Shkol'nik, "Influence of magnetic field on direction of cathode spot plasma jet propagation", I. E. Trans. Plas. Sci., 2013, v.41, no.8, part II, pp.1911-1916.
- S. M. Shkol'nik, "Anode phenomena in arc discharges: a review", PSST, 2011, v.20, 013001.
- I. N. Poluyanova, K. K. Zabello, A. A. Logatchev, V. V. Yakovlev, S. M. Shkol'nik, "Measurements of Thermal Radiation Brightness of Anode Surface After Current Zero for a Range of Current Levels", I. E. Trans. Plas. Sie., 2017, vol.45, no.8, part.II, pp.2119-2125.

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

АТОМИСТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Базовое подразделение – сектор Теории квантовых когерентных явлений в твёрдом теле

В последние годы значительный интерес вызывают задачи, связанные с контролем тонкой спиновой и долинную структуры состояний носителей в наноструктурах. При этом роль гетероинтерфейсов для спиновой структуры оказывается существенной, а для долинной — определяющей: междолинное смешивание в полупроводниках возможно только в меру нарушения трансляционной инвариантности. Понижение вращательной симметрии. связанное с наличием интерфейса, приводит к дополнительному каналу смешивания спиновых состояний. На важность интерфейсных эффектов в полупроводниковых гетероструктурах и необходимость выхода за рамки распространенного метода эффективной массы обратили внимание И.Л. Алейнер и Е.Л. Ивченко [Письма в ЖЭТФ 55, 662 (1992)]. Для расчёта электронных и оптических свойств полупроводниковых наноструктур с учетом влияния интерфейсов, теоретиками ФТИ им. А.Ф. Иоффе (М.О. Нестоклон, А.С. Поддубный, А.Д. Авдеев) был разработан обобщённый метод сильной связи. На его основе, также используя анализ полученных результатов в рамках метода эффективной массы, удалось исследовать вклад интерфейсов в линейное по волновому вектору спиновое расщепление подзон размерного квантования в квантовых ямах; изучить тонкую долинную структуру в квантовых точках и квантовых проволоках из многодолинных материалов; проанализировать влияние долинной структуры энергетического спектра на оптические свойства.

Метод сильной связи — полуэмпирический атомистический метод расчёта электронных состояний, который состоит в разложении одноэлектронного уравнения Шредингера по базису «атомных орбиталей»: функций, которые предполагаются локализованными вблизи атомов. В таком базисе гамильтониан представим матрицей размерности $N \times N$, здесь $N = N_a \cdot N_b$, где N_a — число атомов в структуре, а N_b — число базисных функций на атоме. Матрица гамильтониана сильно разрежена: из-за быстрого затухания базисных функций обычно ограничиваются лишь матричными элементами между первыми/вторыми/т.д. соседями. Энергии электронных состояний являются собственными числами этой матрицы, а её собственные век-



тора соответствуют волновым функциям. Матричные элементы гамильтониана в этом приближении выражаются через эмпирические параметры перекрытия орбиталей, направляющие косинусы и длины химических связей между атомами. Параметры подбирают так, чтобы воспроизводить зонную структуру объёмных материалов, рассчитанную из первых принципов и/или полученную экспериментально. Для воспроизведения зонной структуры основных полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaAs, HgTe, CdTe, PbSe и подобных) с точностью в несколько мэВ в пределах ~10 эВ вблизи запрещённой зоны обычно достаточно 20 орбиталей на атом (с учетом спина). Оказывается, что параметры метода определяются главным образом лишь типом атома и химической связи, что позволяет значительно упростить параметризацию для более сложных полупроводниковых наносистем, сохраняя при этом высокую точность расчетов.

Одним из основных направлений исследований было изучение спинового расшепления в квантовых ямах на основе материалов с решёткой цинковой обманки. Перспективным объектом исследований, с точки зрения спинтроники, являются (110) квантовые ямы, так как в них сильно подавлена спиновая релаксация по механизму Дьяконова-Переля. Ранее нами было показано, что в гамильтониане электрона в таких квантовых ямах есть дополнительное слагаемое, возникающее из-за интерференции объёмного и интерфейсного вкладов в спиновое расщепление. Роль интерфейсного вклада была изучена в работе [1] с использованием атомистического и k·p расчетов. Оригинальная схема получения параметров сильной связи для твёрдых растворов позволила проанализировать влияние упругих деформаций на спиновое расщепление электронных состояний в (110) квантовых ямах [2]. В работе [3] было показано, что интерфейсный вклад в спиновое расщепление приводит к новому эффекту: сдвигу дираковских конусов в топологических изоляторах на основе квантовых ям HgTe/CdHgTe критической толщины. На рисунке показана зависимость энергии размерного квантования в ямах HgTe с барьерами CdHqTe от ширины квантовой ямы и энергия состояний в зависимости от латерального волнового вектора.

Другим важным направлением исследований было изучение междолинного смешивания на интерфейсах и его роли в тонкой структуре состояний в наноструктурах на основе многодолинных материалов. Ранее нами было, что величина междолинного расщепления в квантовых точках на основе PbSe и PbS может достигать сотен мэВ и сильно зависит от положения геометрического центра сферической квантовой точки по отношению к положениям атомов: для квантовых точек без центра инверсии междолинное смешивание оказывается существенно подавлено. Была исследована тонкая структура состояний в квантовых проволоках на основе PbSe [4] и показано, что микроскопическая структура поверхности сильно влияет на величину долинного расщепления. Кроме того, было предсказано. что в некоторых квантовых проволоках может наблюдаться гигантское, вплоть до 1 эВА, линейное по волновому вектору спиновое расщепление подзон. Также была детально исследована структура электронных состояний и оптические свойства квантовых точек ядро-оболочка Ge/Si (см. подробнее статью И.Н. Яссиевич в этом сборнике).

Развитая теория тесно связана с экспериментами. Атомистические расчёты позволили объяснить особенности оптических переходов в квантовых точках (In, Ga)As/GaP [5]. Оказалось, что основной оптический переход осуществляется между состоянием дырки в квантовой точке и электроном, локализованным вблизи вершины точки в матрице, что было впоследствии подтверждено экспериментально. Предсказанное расщепление дираковских конусов [4] позволило объяснить особенности спинового расщепления в структурах двумерных топологических изоляторов на основе HgTe/CdHgTe. Тонкая структура энергетического спектра, обусловленная междолинным смешиванием в квантовых точках из PbS, была также подтверждена экспериментально.

Публикации

- P.S. Alekseev, M.O. Nestoklon, Effective one-band approach for the spin splittings in quantum wells, Phys. Rev. B 95, 125303 (2017).
- M.O. Nestoklon, S.A. Tarasenko, R. Benchamekh, P. Voisin, Spin splitting of electron states in lattice-mismatched (110)-oriented quantum wells, Physical Review B 94, 115310 (2016).
- 3. S.A. Tarasenko, M.V. Durnev, M.O. Nestoklon, E.L. Ivchenko,

J.-W. Luo, A. Zunger, Split Dirac cones in HgTe/CdTe quantum wells due to symmetry-enforced level anticrossing at interfaces, Physical Review B 91, 081302 (2015).

- 4 I.D. Avdeev, A.N. Poddubny, S.V. Goupalov, M.O. Nestoklon, Valley and spin splittings in PbSe nanowires, Phys. Rev. B 96, 085310 (2017).
- C. Robert, M.O. Nestoklon, K. Pereira da Silva, L. Pedesseau, C. Cornet, M.I. Alonso, A.R. Goñi, P. Turban, J.-M. Jancu, J. Even, O. Durand, Strain-induced fundamental optical transition in (In, Ga) As/ GaP quantum dots, Applied Physics Letters 104, 011908 (2014).

ТЕОРИЯ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ

Базовое подразделение — сектор Теории твердого тела

Теоретические исследования дефектов кристаллической решетки в ФТИ были инициированы в середине 60-х годов прошлого века. Первоначально исследования были посвящены кинетике дислокаций и трещин в кристаллах, диффузии точечных дефектов (в том числе в условиях внешнего радиационного воздействия), коллективным эффектам в ансамбле дислокаций, строению и свойствам межкристаллитных границ, а также дисклинационным дефектам.

В последние годы главные и признанные научной общественностью результаты были получены в теории дисклинаций в твердых телах, в области мезоскопического моделирования пластической деформации и разрушения, в анализе физико-механических свойств наноструктурных и нанокомпозитных материалов, в развитии теории наномеханики дефектов в тонкопленочных материалах электроники и оптоэлектроники, в исследовании теоретических основ функционирования современных оптоэлектронных устройств.

Теория дисклинаций в твердых телах.

Была разработана теория дисклинаций — линейных дефектов, нарушающих поворотную симметрию в двумерных и трехмерных твердых телах — вместе с соответствующим математическим аппаратом [1]. Впервые были получены решения для упругих полей и энергий разнообразных дисклинационных конфигураций в бесконечных упругих средах, при наличии поверхностей и границ раздела, в тонких слоях и ограниченных твердых телах [2]; использованы методы линейной и нелинейной теории упругости, а также компьютерного моделирования.

Мезоскопические модели пластической деформации и разрушения.

Исследования в данном направлении перекрывают разрыв между микроскопическим и макроскопическим подходами в физике и механике пластичности и разрушения. Впервые были предложены качественные и количественные модели, учитывающие появление типичных структурных элементов в деформируемых кристаллических телах с характерным мезоскопическим масштабом от 10 нм до 1 мкм. Были выявлены критические условия появления и распространения мезоскопических полос переориентации и двойников в кристаллах. Предсказания теории были подтверждены в независимых экспериментах. Был предложен подход к количественному описанию так называемого неравновесного состояния границ зерен в поликристаллах, в том числе и для поликристаллического графена [3, 4].

Физико-механические свойства наноструктурных и нанокомпозитных материалов.

Концепция дисклинаций и общий подход теории дефектов в твердых телах были успешно применены для объяснения физико-механического поведения таких перспективных материалов, как ультрамелкозернистые и наноструктурные поликристаллы, композитные материалы с наноразмерными включениями, нанотрубки и наночастицы [5]. Наиболее значимые результаты относятся к предсказанию величины напряжения течения и измельчения структуры в ходе интенсивной пластической деформации нанополикристаллов, стабильности дислокаций в наноструктурных материалах, пластической релаксации нановключений (квантовых точек в полупроводниках) и детальному анализу пентагональной симметрии в нано – и микрочастицах в широком классе материалов с ГЦК кристаллической структурой.

Наномеханика дефектов в тонкопленочных материалах электроники и оптоэлектроники.

Важность данного направления продиктована многочисленными примерами использования тонкопленочных материалов и структур в современных полупроводниковых электронных и оптоэлектронных приборах и устройствах. В связи с этим была поставлена и теоретически исследована общая проблема механической устойчивости нанослоев. Новые результаты были получены для предсказания зарождения и снижения плотности дислокаций в растущих полупроводниковых слоях (например, GaAs и GaN) [6] и доменов в слоях ферроиков (например, цирконате-титанате свинца и манганите лантана-стронция). Последние достижения по этому направлению относятся к выявлению связи между электронно-оптическими и механическими свойствами квантовых точек и полуполярных слоев III-нитридов [6], а также в области изучения перспективного материала оптоэлектроники — оксида галлия (β-Ga₂O₃) [7].

Публикации

- A. L. Kolesnikova, M.Yu. Gutkin, A. E. Romanov, Elastic models of defects in 3D and 2D crystals, Reviews on Advanced Materials Science 51, 130 (2017).
- A. L. Kolesnikova, M.Yu. Gutkin, A. V. Proskura, N. F. Morozov, A. E. Romanov, Elastic fields of straight wedge disclinations axially piercing bodies with spherical free surfaces, International Journal of Solids and Structures 99, 82 (2016).
- A. E. Romanov, A. L. Kolesnikova, T. S. Orlova, I. Hussainova, V. E. Bougrov, R. Z. Valiev, Non-equilibrium grain boundaries with excess energy in graphene, Carbon 81, 223 (2015).
- A. L. Kolesnikova, M.A. Rozhkov, I. Hussainova, T. S. Orlova, I. S. Yasnikov, L. V. Zhigilei, A. E. Romanov, Structure and energy of intercrystallite boundaries in graphene, Reviews on Advanced Materials Science 52, 91 (2017).
- A. L. Kolesnikova, M.Yu. Gutkin, A. E. Romanov, Analytical elastic models of finite cylindrical and truncated spherical inclusions, International Journal of Solids and Structures 143, 59-72 (2018).
- A. M. Smirnov, E. Young, J. S. Speck, V. E. Bougrov, A. E. Romanov, Critical conditions for misfit dislocation nucleation via nonbasal slip in semipolar III-nitride layers, A. L. Materials 4, 016105 (2016).
- S. I. Stepanov, V. I. Nikolaev, V. E. Bougrov, A. E. Romanov, Gallium oxide: properties and applications — a review, Reviews on Advanced Materials Science 44, 63 (2016).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ СЛОЯХ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Базовое подразделение — лаборатория Новых неорганических материалов

Разработан новый формализм метода кинетического Монте-Карло и методология прямого численного расчета химического потенциала жидкостей и кристаллических тел. Сформулирована новая физическая интерпретация химического потенциала как характеристики, связанной с молекулярным потоком [1.2]. Это позволило эффективно и с высокой точностью рассчитывать термодинамические характеристики молекулярных слоев на поверхности твердых тел и происходящих в них фазовых переходов 1-го рода (плавление -кристаллизация) а также ориентационных фазовых переходов [3-5]. Разработанная методология используется и для моделирования процессов, происходящих в объеме пор нанопористых материалов, а также в объемных средах для индивидуальных веществ и их смесей.

В качестве примера, на рисунке приведена иллюстрация поведения молекулярного слоя азота на поверхности графита с ростом температуры [3]. На левой панели показано изменение составляющей тангенциального давления. связанной с квадруполь-квадрупольным взаимодействием молекул азота. При низких температурах ориентационное упорядочивание в виде «елочки» характеризуется анизотропией давления. Анизотропия исчезает при фазовом переходе типа дальний — ближний порядок при 25.8 К, но ориентационная составляющая проявляется вплоть до критической температуры двумерного слоя. Надежно идентифицируется и точка плавления при 31.9 К, что полностью подтверждено экспериментальными данными. На правой панели показано изменение внутренней энергии при ориентационном фазовом переходе.

На основе предложенного подхода удалось описать термодинамические свойства и фазовые переходы азота, криптона, аргона и водорода [3-6] на графите. В случаях азота и криптона описаны также переходы кристалл — кристалл между фазами, которые согласованы или не согласованы с решеткой подложки. Впервые показано, что кристаллический монослой может производить сильное сжатие или растяжение подложки в плоскости, параллельной поверхности.



Подробный анализ различных систем на основе

Temperature (K)

синтеза молекулярных расчетов и термодинамики позволил детально описать их фундаментальные термодинамические характеристики, такие, как свободная энергия Гельмгольца, Гиббса и энтропия, что имеет значительный ресурс дальнейшего развития, в том числе, и в прикладном значении. Так, на основе анализа низкотемпературной адсорбции водорода углеродными активными углями, удалось создать новый метод для определения функции распределения поверхности и объема микропор по размерам, позволяющий выявить зависимость их структуры от прекурсора и условий их получения [6].

Публикации

 E.A. Ustinov. Efficient chemical potential evaluation with kinetic Monte Carlo method and non-uniform external potential: Lennard-Jones fluid, liquid, and solid. J. Chem. Phys. 147, 014105 (2017)

- E.A. Ustinov. Thermodynamics and simulation of hard-sphere fluid and solid: Kinetic Monte Carlo method versus standard Metropolis scheme. J. Chem. Phys. 146, 034110 (2017)
- E. Ustinov, V. Gorbunov, and S. Akimenko. From simulation to thermodynamics of orientational transitions in molecular layers: Nitrogen contact layer on solids. J. Phys. Chem. C 122, 5, 2897-2908 (2018)
- E.A. Ustinov. Effect of crystallization and surface potential on the nitrogen adsorption isotherm on graphite: A refined Monte Carlo simulation. Carbon 100, 52-63 (2016)
- E.A. Ustinov. Effect of solid-like nitrogen contact layers on graphite: anisotropy of tangential pressure and orientational order. Adsorption 22, 425-436 (2016)
- E.A. Ustinov, V. Yu. Gavrilov, M. S. Melgunov, V. V. Sokolov, V. P. Berveno and A.V Berveno. Characterization of activated carbons with low-temperature hydrogen adsorption. Carbon 121, 563-573 (2017)

РЕЗОНАНСНОЕ КОСВЕННОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Базовое подразделение – сектор Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках

Несмотря на определенные успехи в создании объемных магнитных полупроводников, большинство исследований в области интеграции магнетизма в современную полупроводниковую электронику в настоящее время сосредоточено на низкоразмерных гетероструктурах. В отличие от прям`ого обменного взаимодействия, характерного для металлических ферромагнетиков, магнитные свойства полупроводниковых материалов, легированных парамагнитными примесями, обусловлены косвенным обменным взаимодействием. Косвенное обменное взаимодействие не предполагает непосредственного перекрытия атомных орбиталей парамагнитных атомов или ионов, взаимодействие каждого магнитного иона осуществляется со слабо локализованным или свободным электроном, волновая функция которого охватывает оба иона. Изменяя волновую функцию такого электрона, являющегося «переносчиком» обменного взаимодействия, можно влиять и на магнитные свойства всей структуры. Нами исследованы полупроводниковые гетероструктуры с квантовой ямой и легирующим слоем магнитной примеси в барьере, рис. 1. В этом случае переносчиками косвенного обмена между парамагнитными примесными ионами выступают электроны или дырки в квантовой яме.

Важной особенностью полупроводниковых гетероструктур является наличие локализованных состояний на парамагнитной примеси, отсутствующих в металлах из-за сильной экранировки кулоновского потенциала примеси. Энергия такого локализованного состояния определяет скорость туннелирования носителей из квантовой ямы (КЯ) на магнитную примесь и,



Рисунок 1. Схема резонансного косвенного обмена двух магнитных центров, расположенных рядом с квантовой ямой (верхняя панель), ее энергетическая диаграмма (нижняя панель). Энергии *E*₁, *E*₃ — нерезонансный случай, *E*₂ — резонансная түннельная связь с носителями квантовой ямы.

следовательно, величину косвенного обменного взаимодействия между примесями. Особенно интересен случай резонансного косвенного обмена, когда энергия локализованного состояния лежит в диапазоне заполненных состояний двумерного электронного газа и возникает эффективная резонансная гибридизация такого локализованного уровня с континуумом двумерных состояний. В этом случае стандартная теория косвенного обмена (известная также как теория РККИ), базирующаяся на расчете энергии электронного газа в зависимости от ориентации спинов магнитных ионов во втором порядке теории возмущений, не применима и приводит к расходимостям. Это связанно с сильной модификацией волновой функции делокализованных носителей в квантовой яме с энергиями близкими к резонансному состоянию. Взаимодействие внутренней магнитной оболочки иона с носителями заряда описывается контактным гамильтонианом:

$$H_J = J\hat{S} \Big[\delta \big(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{R}_1 \big) \hat{\boldsymbol{I}}_1 + \delta \big(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{R}_1 \big) \hat{\boldsymbol{I}}_2 \Big],$$

где $R_{I,2}$ – положения ионов, $\hat{I}_{I,2}$, \hat{S} – операторы спина для иона и электронов, соответственно, J – константа обменного взаимодействия. В работе рассчитывалась энергия косвенного обмена в случае слабой константы взаимодействия магнитного центра и носителей заряда $Jv(E_F) <<1$, где $v(E_F)$ – плотность состояний на уровне Ферми (E_F) . Однако, резонансная туннельная связь была учтена точно. В этом режиме можно заменить операторы спина магнитных центров на векторы и рассчитывать энергию косвенного обмена как разность энергий фиксированного числа делокализованных носителей при различной спиновой конфигурации примесей:

$$E_{exc} = E(\uparrow\uparrow) - E(\downarrow\downarrow).$$

Для нахождения энергии делокализованных носителей рассматривался гамильтониан системы, состоящий из суммы трех вкладов

$$H = H_0 + H_T + H_J,$$

где H_{θ} – гамильтониан свободных носителей и локализованных состояний магнитных центров (примесей), описывает туннелирование делокализованных носителей в локализованные состояния магнитных центров, H_{μ} представленный выше, описывает обменное вза-



$$E_{exc} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{E_{F}} d\epsilon \arctan\left(\frac{8\pi^{2}T_{1}T_{2}J_{0}\left(kR\right)Y_{0}\left(kR\right)}{\left[\left(\epsilon - \epsilon_{1}\right)^{2} - j^{2}\right]\left[\left(\epsilon - \epsilon_{2}\right)^{2} - j^{2}\right]}\right],$$

где $k = \sqrt{2m\epsilon} / \hbar$, R – расстояние между центрами в пло-

скости ямы, $j = |JIs| |\psi_{loc}(0)|^2$ – энергия обменного взаимодействия локализованного носителя на магнитном центре, Т – параметр, описывающий туннельную связь *i-го* (i=1,2) центра с квантовой ямой, ϵ_i – энергия локализованного состояния *i*-го центра, J_{ρ} , Y_{ρ} – функции Бесселя и Неймана нулевого порядка. Это выражение содержит полюса, соответствующие энергиям локали-зованных состояний магнитных центров. В случае если полюса попадают в область интегрирования, т.е. в спектр делокализованных состояний, возникает резонансное усиление энергии взаимодействия. Оценки с учетом параметров реальных структур с КЯ, показывают, что в резонансном случае энергия косвенного обмена может превышать на несколько порядков ее величину в нерезонансном случае, когда энергия локализованного состояния лежит вне полоски заполненных состояний в квантовой яме [1], рис. 2. В нерезонансном случае, интеграл в E_{exc} может быть вычислен точно и совпадает с классической теорией косвенного обменного взаимодействия.

Разработанная теория была применена для объяснения немонотонной зависимости температуры Кюри магнитного слоя в гибридной гетероструктуре GaAs/ Mn δ -слой/GaAs/In_xGa_{1-x}As яма/GaAs, см. рис. 1. При изменении глубины квантовой ямы происходит изменения резонансного условия для косвенного обмена, и в случае $\epsilon_1 \in [0, E_p]$ наблюдается увеличение температуры Кюри. Теоретический расчет температуры Кюри Т_с в зависимости от глубины квантовой ямы [2] описывает данные эксперимента, рис 3, левая панель.

Другой интересной системой, в которой возможно резонансное косвенное обменное взаимодействие, является графен с магнитными адатомами. Эффективное изменение уровня Ферми в графене с помощью затвора позволяет управлять условием резонансной связи локализованного состояния на адатоме с двумерными состояниями графена за счет изменения уровня химического потенциала двумерных носителей относительно уровней локализованных состояния



Рисунок 3. (Левая панель) Зависимость температуры Кюри *δ*-слоя Mn от глубины квантовой ямы In_xGa_{1,x}As. Эксперимент (круги) и расчет (сплошные кривые). (Правая панель) Энергия косвенного обменного взаимодействия магнитных адатомов расположенных на поверхности графена, как функции положения уровня Ферми. Энергия локализованного состояния $\epsilon_{0=}$ 10 meV, расстояние между адатомами равно $R = 2 \mu_M$, адатомы расположены над атомами углерода подрешетки А.

магнитных примесей. Это создает возможность значительной модуляции магнитного взаимодействия электрическим способом, рис. 3 (правая панель). Взаимодействие магнитных центров в графене в рамках теории РККИ изучалось ранее, и было показано, что в зависимости от типа связи адатомов с подрешетками графена происходит изменение типа магнитного взаимодействия (на малых расстояниях $R < \lambda_F$, где λ_F – фермиевская длина волны. Если адатомы связаны с одинаковыми подрешетками графена, то взаимодействие имеет ферромагнитный тип. В случае связи с разными подрешетками, оно антиферромагнитно. Однако, наличие локализованного состояния у адатомов существенно меняет картину косвенного обмена.

Для рассмотрения общего случая связи с подрешетками использовался туннельный гамильтониан общего вида:

$$H_{T} = t_{1,A} \hat{a}_{R_{1}}^{+} \hat{f}_{1} + t_{1,B} \hat{a}_{R_{1}}^{+} \hat{f}_{1} + t_{2,A} \hat{b}_{R_{2}}^{+} \hat{f}_{2} + t_{2,B} \hat{b}_{R_{2}}^{+} \hat{f}_{2} + h.c.,$$

где $t_{i,\alpha}$ — туннельный матричный элемент связывающий *i*-й адатом с подрешеткой $\alpha_i \hat{f}_i, \hat{a}_{R_i}, \hat{b}_{R_i}$ – операторы уничтожения *i*-го локализованного состояния электрона в графене с координатой R_i в подрешетках A и B, соответственно.

Проведенный нами расчет энергии парного резонансного косвенного обменного взаимодействия показал, что независимо от типа связи адатомов с подрешетками графена тип магнитного взаимодействия определяется положением уровня локализованного состояния относительно нулевой точки графена [3]. Если энергия локализованного состояния лежит в валентной зоне, то взаимодействие имеет антиферромагнитный тип, в зоне проводимости– — ферромагнитный тип.

Публикации

- I. V. Rozhansky, I. V. Krainov, N. S. Averkiev, and E. Lähhderanta, Resonant exchange interaction in semiconductors, Phys. Rev. B 88, 155326 (2013).
- 2. I. V. Rozhansky, I. V. Krainov, N. S. Averkiev, B. A. Aronzon, A. B.

Davydov, K. I. Kugel, V. Tripathi, and E. Lähderanta, Resonant indirect exchange via spatially separated two-dimensional channel, Applied Physics Letters 106, 252402 (2015). I. V. Krainov, I. V. Rozhansky, N. S. Averkiev, and E. Lähderanta, Indirect exchange interaction between magnetic adatoms in graphene, Phys. Rev. B 92, 155432 (2015).

топологические изоляторы

Базовое подразделение — сектор Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле

Развитие физики полупроводников привело в начале XXI века к теоретическому предсказанию и последующему экспериментальному открытию топологических изоляторов — диэлектрических трехмерных или двумерных кристаллических систем, имеющих устойчивые проводящие поверхностные состояния (С.L. Kane, E.J. Mele, 2005). Согласно современным представлениям, объемными топологическими изоляторами (класса Z₂) являются некоторые двойные и тройные соединения Bi, Sb, Se, Te, твердые растворы на их основе, напряженные слои HgTe, двумерными топологическими изоляторами — квантовые ямы HgTe/CdHgTe и InAs/GaSb определенной толщины, а также политипы 1T' двумерных кристаллов типа WTe₂.

«Топологически защищенные» поверхностные и краевые состояния, устойчивые к внешним воздействиям, дефектам и неоднородностям границы, формируются в материалах, в которых запрещенная зона в энергетическом спектре обусловлена спин-орбитальным взаимодействием. Топологические состояния являются спиральными, т.е. обладают жесткой корреляцией между направлением квазиимпульса и ориентацией спина, что приводит к возникновению новых интересных спиновых и электродинамических эффектов, таких как квантовый спиновый эффект Холла и топологический магнитоэлектрический эффект. Всё это делает топологические изоляторы чрезвычайно привлекательными объектами для фундаментальных и прикладных исследований, перспективными для создания новых функциональных материалов, электронных и оптоэлектронных приборов на их основе.

Учёными ФТИ совместно с коллегами из Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова и университета Регенсбурга выполнены теоретические и экспериментальные исследования электронной структуры топологических изоляторов, изучено взаимодействие электромагнитного поля с топологическими изоляторами, обнаружены и исследованы поверхностные и краевые фотогальванические эффекты, предложены новые методы характеризации структур.

Наиболее впечатляющие результаты в физике двумерных топологических изоляторов получены на квантовых ямах HgTe/CdHgTe. Объемный кубический HgTe является бесщелевым полупроводником с инвертированной зонной структурой; электронные состояния в такой системе изучались в работе М.И. Дьяконова и А.В. Хаецкого, 1981. Деформация или эффекты размерного квантования открывают запрещенную зону в спектре носителей заряда (Л.Е. Герчиков, А.В. Субашиев, 1989). В зависимости от толщины и химического состава квантовой ямы и барьеров, которые определяют порядок расположения электронных и дырочных подзон, квантовая яма HgTe/CdHgTe является тривиальным или топологически нетривиальным изолятором (B.A. Bernevig et al., 2006), бесщелевым полупроводником или полуметаллом.

В работе [1] разработана теория дираковских состояний в квантовых ямах HgTe/CdHgTe вблизи перехода «тривиальный изолятор — двумерный топологический изолятор». Показано, что атомная структура
интерфейсов приводит к смешиванию электронных и дырочных подзон. В рамках анализа, основанного на методе теории представлений групп, методе плавных огибающих и атомистических подходах, определены параметры интерфейсного смешивания и величины расщеплений уровней. Показано, что в квантовых ямах критической толщины $d = d_c$ электронный спектр состоит из двух вейлевских конусов, сдвинутых по энергии друг относительно друга. В квантовых ямах с d> d_c открывается топологически нетривиальная щель. Расщепление дираковских состояний приводит к особенностям в спектре магнитоосцилляций и спектре поглощения терагерцового излучения [1].

В квантовых ямах с инвертированной зонной структурой вдоль латеральных краев образца формируются одномерные спиральные состояния, волновые функции которых экспоненциально затухают вглубь квантовой ямы. На рис. 1а представлен спектр электронных состояний в такой системе. Помимо делокализованных в плоскости ямы «объемных» состояний спектр содержит две ветви, которые находятся в запрещенной зоне «объемных» состояний и описывают краевые спиральные состояния. Вблизи точки пересечения ветвей спектр краевых состояний линеен и описывается эффективным одномерным вейлевским гамильтонианом.

Эффекты интерфейсного смешивания определяют также спиновую структуру краевых состояний и приводят к анизотропии эффективного g-фактора [2]. Для магнитного поля, лежащего в плоскости ямы, предсказана значительная анизотропия эффекта Зеемана (рис. 1б). Магнитное поле, поперечное плоскости квантовой ямы, также приводит к возникновению энергетической щели в спектре краевых состояний. С ростом магнитного поля происходит переход от фазы квантового спинового эффекта Холла (двумерный топологический изолятор класса Z₂) к фазе квантового эффекта



Рисунок 1. Электронный спектр объемных и краевых состояний в полоске, сделанной из квантовой ямы HgTe/CdHgTe c d > d_c. (a) Дисперсия электронных состояний. Красные линии соответствуют спиральным состояниям, локализованным вблизи краев полоски. (б) Зеемановская щель в спектре краевых состояний в зависимости от ориентации внешнего магнитного поля B = 3 T, лежащего в плоскости квантовой ямы, и ориентации края полоски.

Теория конденсированных сред



Рисунок 2. Краевой фотогальванический эффект в двумерном топологическом изоляторе на основе квантовой ямы HgTe/CdHgTe. (a) Возможные типы оптических переходов с участием краевых состояний, приводящие к генерации фототока. (б) Зависимости циркулярного краевого фототока от напряжения на затворе структуры, полученные экспериментально для двух различных энергий фотонов.

Холла (двумерный топологический изолятор класса Z).

Экспериментальное исследование поверхностных и краевых состояний в топологических изоляторах часто затруднено, поскольку линейный электрический и оптический отклик структуры может содержать значительный, а порой доминирующий, вклад от объемных состояний. Замечательную возможность изучения топологических состояний, определения их спиновой структуры, электрон-фотонного взаимодействия и правил отбора дает фотогальваническая спектроскопия. В топологических изоляторах фотогальванические эффекты, связанные с краевыми состояниями, могут быть экспериментально отделены от «объемных» фотогальванических эффектов, поскольку они возникают и при возбуждении структуры излучением с энергией кванта $\hbar \omega$, меньшей ширины запрещенной зоны. Дополнительную информацию о природе фототока дает его поляризационная зависимость, которая, как правило, различна для краевых и объемных вкладов в

фототок.

Проведенные исследования объемных, поверхностных и краевых фотогальванических эффектов позволили восстановить спектр носителей заряда, изучить механизмы формирования фототока для различных диапазонов длин волн [3-4]. В топологических изоляторах на основе пленок HgTe изучен фотогальванический эффект во внешнем магнитном поле, нормальном по отношению к поверхности пленки [4]. Обнаружено значительное увеличение фототока в условиях циклотронного резонанса, когда частота электромагнитного поля близка к циклотронной частоте поверхностных носителей заряда. Разработана теория фотогальванического эффекта в условиях циклотронного резонанса [4], показано, что генерация тока обусловлена асимметрией рассеяния поверхностных носителей заряда в импульсном пространстве.

В ФТИ также разработана теория электрон-фотонного взаимодействия и фотогальванических эффектов для краевых спиральных каналов в двумерных топологических изоляторах на основе кристаллов без центра пространственной инверсии. В зависимости от энергии фотона, ширины запрещенной зоны и положения уровня Ферми краевые фотогальванические эффекты связаны с различными типами оптических переходов, рис. 2а. Прямые оптические переходы между краевыми состояниями с противоположной проекцией спина возможны, если $\hbar \omega > 2E_{_{F}}$, где $E_{_{F}}$ — энергия Ферми, отсчитанная от вейлевской точки. Такие переходы разрешены в магнито-дипольном приближении и в электро-дипольном приближении при учете пространственной асимметрии структуры. Прямые оптические переходы в электро-дипольном приближении могут также идти между краевыми состояниями и объемными состояниями зоны проводимости или валентной зоны (В.О. Каладжан, П.П. Асеев, С.Н. Артеменко, 2015). Наконец, поглощение высокочастотного излучения может быть связано с непрямыми оптическими переходами с участием примесей или фононов (М.В. Энтин, Л.И. Магарилл, 2016). Такие переходы требуют учета нелинейности спектра, виртуальных процессов с промежуточными состояниями в зоне проводимости или валентной зоне или рассеяния с переворотом спина.

Эффект генерации краевого фототока в топологических изоляторах на основе квантовых ям HgTe/ CdHgTe при поглощении терагерцового излучения с энергией кванта, меньшей ширины запрещенной зоны, наблюдался в работе [5]. Фототок на противоположных краях образца тек в противоположные стороны, направление фототока определялось знаком циркулярной поляризации излучения, рис. 2б. Анализ зависимости фототока от напряжения на затворе структуры и эффективности различных механизмов генерации тока показал, что фототок в определенном диапазоне напряжений на затворе связан с фотоионизацией краевых состояний в зону проводимости. При поглощении циркулярно поляризованного излучения, например поляризации σ+, вероятность оптических переходов из ветви краевых состояний с проекцией спина +1/2 больше, чем вероятность оптических переходов из ветви состояний с проекцией спина —1/2. Поскольку для краевых состояний проекция спина жестко скоррелирована с направлением импульса, спин-зависимая асимметрия оптических переходов и приводит к генерации электрического тока вдоль края образца. При смене знака циркулярной поляризации излучения асимметрия оптических переходов меняет знак, и фототок меняет направление на противоположное. Разработана количественная теория краевого фотогальванического эффекта [5], которая хорошо описывает наблюдаемый спектр возбуждения фототока при фотоионизации краевых носителей заряда в зону проводимости.

- S.A. Tarasenko, M.V. Durnev, M.O. Nestoklon, E.L. Ivchenko, J.-W. Luo, and A. Zunger, Split Dirac cones in HgTe/CdTe quantum wells due to symmetry-enforced level anticrossing at interfaces, Phys. Rev. B **91**, 081302(R) (2015).
- M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, Magnetic field effects on edge and bulk states in topological insulators based on HgTe/CdHgTe quantum wells with strong natural interface inversion asymmetry, Phys. Rev. B **93**, 075434 (2016).
- P. Olbrich, C. Zoth, P. Vierling, K.-M. Dantscher, G.V. Budkin, S.A. Tarasenko, V. V. Bel'kov, D.A. Kozlov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretsky, and S. D. Ganichev, Giant photocurrents in a Dirac fermion system at cyclotron resonance, Phys. Rev. B 87, 235439 (2013).
- K.-M. Dantscher, D. A. Kozlov, P. Olbrich, C. Zoth, P. Faltermeier, M. Lindner, G.V. Budkin, S.A. Tarasenko, V.V. Bel'kov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretsky, D. Weiss, B. Jenichen, and S.D. Ganichev, Cyclotron-resonance-assisted photocurrents in surface states of a three-dimensional topological insulator based on a strained high-mobility HgTe film, Phys. Rev. B **92**, 165314 (2015).
- K.-M. Dantscher, D. A. Kozlov, M. T. Scherr, S. Gebert, J. Bärenfänger, M. V. Durnev, S. A. Tarasenko, V. V. Bel'kov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretsky, Z. D. Kvon, J. Ziegler, D. Weiss, and S. D. Ganichev, Photogalvanic probing of helical edge channels in two-dimensional HgTe topological insulators, Phys. Rev. B 95, 201103(R) (2017).

ВЕЙЛЕВСКИЕ ПОЛУМЕТАЛЛЫ

Базовые подразделения — сектор Физической кинетики и электроакустических явлений, сектор Теории полупроводников и диэлектриков

Существуют много различных трехмерных систем с топологически нетривиальной электронной зонной структурой. В полуметаллах Вейля зона проводимости и валентная зона касаются в особых точках зоны Бриллюэна, в близи которых электроны обладают релятивистским законом дисперсии и описываются уравнением Вейля. Например, для полуметалла с центром пространственной инверсии, но с нарушенной симметрией к обращению хода времени, эти зоны касаются в двух точках с импульсами $\pm k_o$ и энергией ϵ_o , в окрестности которых гамильтониан системы может быть разложен в ряд Тейлора по малым отклонениям импульса $H_{s}(\mathbf{k}) = [\epsilon_{0} + s\hbar \mathbf{v}_{0} \cdot (\mathbf{k} - s\mathbf{k}_{0})] \sigma_{0} + s\hbar v_{F}(\mathbf{k} - s\mathbf{k}_{0}) \cdot \sigma$ (1)где σ_0 — единичная матрица 2×2, $\sigma = \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – матрицы Паули, ħ — постоянная Планка, а знак s = ± определяет киральность частицы.

Отметим, что при наклоне вейлевского конуса происходит топологический переход между фазами первого $|v_0| < v_E$ и второго $|v_0| > v_E$ родов. Впервые вейлевская фаза первого рода была обнаружена в кристаллах без центра пространственной инверсии, например, в TaP, NbP, TaAs и NbAs [см. обзор N. P. Armitage et al., Rev. Mod. Phys. 90, 015001 (2018)], a cyществование фазы второго рода было предсказано в MoTe₂, WTe₂ и TalrTe₄ [A. A. Soluyanov et al., Nature 527, 495 (2015)]. Недавно фаза первого рода была также обнаружена в магнитных материалах с центром инверсии Co₃Sn₂S₂ и Co₃Sn₂S₂ [Liu et. arxiv: 1712.06722], и предсказана возможность существования фазы второго рода в парамагнитных кристаллах TaAs, NbSb, за счет эффекта Зеемана [D. Gresch et al., New J. Phys. 19, 035001 (2017)].

Одно из фундаментальных свойств полуметаллов Вейля — киральная аномалия, т.е. несохранение разности плотности частиц с противоположной киральностью, вызванное внешними коллинеарными электрическим и магнитным полями. Физику киральной аномалии легко понять следующим образом. Спектр электронов в полуметалле с двумя точками Вейля в магнитном поле имеет два киральных нулевых уровня Ландау с взаимно противоположными скоростями частиц, направленными вдоль магнитного поля. Электрическое поле, приложенное параллельно магнитному, приводит к разбалансу кирального заряда, перекачивая электроны между точками Вейля с противоположной киральностью.

Киральная аномалия связана с уникальными явлениями, таким как аномальный эффект Холла, величина которого определяется только расстоянием между точками Вейля в импульсном пространстве $\sim 2|k_0|$, а также с отрицательным продольным магнетосопротивлением. Впервые было показано, что при наклоне (в англоязычной литературе — tilt) вейлевского конуса аномальные зарядовый и тепловой эффекты Холла перестают быть универсальными и могут менять знак в зависимости от параметров, определяющих наклон конусов [1, 2]. Было доказано [2], что эффект Нернста в вейлевском полуметалле становится ненулевым при наличии наклона ($|v_a| > 0$). Кроме того продемонстрировано, что эффект киральной аномалии проявляется в частотных и полевых зависимостях нелинейных спинового и кирального токов, а также в генерации второй гармоники [3, 4].

Хорошо известны особые топологические состояния в неэрмитовых фотонных системах, а именно в усиливающих средах и метаматериалах. Сравнительно недавно необычные состояния квазичастиц, возникающие, например, при учете электрон-фононного



Вещественная часть спектра вблизи одного из конусов при k_z=0. а) Зона проводимости и валентная зона касаются в вейлевской точке. б) В вейлевской фазе второго рода (наклон конуса по оси k_z) за счет не-эрмитовости возникает плоская зона, внутри которой спектр чисто мнимый, а ее граница состоит из особых точек, где матрица функции Грина квазичастиц дефектна. Из [5].

взаимодействия, стали изучаться в двумерных неэрмитовых дираковских материалах. Впервые были предсказаны трехмерные неэрмитовые вейлевские системы с беспорядком и изучены топологически нетривиальные состояния, возникающие в фазе второго рода $|\mathbf{v}_0| > \mathbf{v}_F$ [5]. При учете рассеяния электронов на беспорядке, их спектр определяется собственно-энергетической частью, $H_s(\mathbf{k}) + \Sigma(\mathbf{k}, \epsilon) = \sigma_0 h_s(\mathbf{k}, \epsilon) + \sigma \cdot \mathbf{h}_s(\mathbf{k}, \epsilon)$, где h_s , моплексные функции энергии и импульса. Вейлевская точка топологически устойчива (сдвигается только по энергии или импульсу, но не исчезает) по отношению к эрмитовому возмущению, при котором мнимые части равны нулю. Однако в неэрмитовых системах может возникать неустойчивость, так как для определения дважды вырожденного нулевого собственного значения **h**_h=0 теперь достаточно двух независимых параметров. Для спектра квазичастиц в неэрмитовых вейлевских системах предсказано существование топологически защищенных плоских зон (см. рисунок) и ферми-арок, имеющих особые точки, в которых матрица функции Грина квазичастиц дефектна. Также предложен новый класс трехмерных неэрмитовых систем с нетривиальной зонной структурой, имеющей плоские зоны в виде кольца, цилиндра и т. д. [5]. В настоящее время исследования в области неэрмитовых электронных систем бурно развиваются, и теоретические работы в ФТИ находятся на переднем крае этого направления.

- A. A. Zyuzin and R. P. Tiwari, "Intrinsic anomalous Hall effect in type-II Weyl semimetals", JETP Lett. 103, 717 (2016).
- Y. Ferreiros, A. A. Zyuzin, and J. H. Bardarson, "Anomalous Nernst and thermal Hall effects in tilted Weyl semimetals", Phys. Rev. B 96, 115202 (2017).
- A. A. Zyuzin, M. Silaev, and V. A. Zyuzin. "Nonlinear chiral transport in Dirac semimetals", arxiv: 1807.01728.
- A. A. Zyuzin and A. Yu. Zyuzin, "Chiral anomaly and second harmonic generation in Weyl semimetals", Phys. Rev. B 95, 085127 (2017).
- A. A. Zyuzin and A. Yu. Zyuzin, "Flat band in disorder driven nonhermitian Weyl semimetals", Phys. Rev. B 97, 041203(R) (2018).

ГИДРОДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОЙ ЖИДКОСТИ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Базовое подразделение – сектор Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках

В проводящих твердых телах, в которых доминируют межчастичные столкновения, свободные носители заряда могут, подобно частицам обычных жидкостей, демонстрировать коллективное гидродинамическое поведение, что в значительной степени определяет отклик таких систем на внешние воздействия [Р.Н. Гуржи, УФН 94, 689 (1968)]. Например, чем чаще происходят электрон-электронные столкновения, тем меньше вязкость электронной жидкости и, поэтому, меньше сопротивление току — своеобразный эффект смазки. В последние годы в связи с созданием сверхчистых двумерных структур на основе обычных полупроводников, графена и топологических изоляторов наблюдается чрезвычайный всплеск интереса к гидродинамике электронных систем. В этой области Институтом был получен ряд важных нетривиальных результатов.

Гидродинамика двумерных систем на основе обычных полупроводников.

Дано теоретическое объяснение экспериментально наблюдаемого в высококачественных двумерных структурах гигантского, до двух порядков, отрицательного магнетосопротивления [1]. Это явление было предложено связывать с формированием вязкого течения электронной жидкости с коэффициентом вязкости, уменьшающимся с ростом магнитного поля по закону $\eta = \eta_0 / (1 + 4\omega_c^2 \tau_{ee}^2)$, где ω_c — циклотронная частота, а τ_{ee} – время е-е столкновений. Подавление вязкости сильным полем нетрудно понять, если вспомнить, что она обусловлена случайными блужданиями частиц жидкости, вызванными их взаимодействием, и учесть, что при @т.>>1 сдвиг электрона в результате столкновений равен циклотронному радиусу R_. ∝ 1/ω_.. Построена основанная на этом свойстве теория магнетосопротивления для простейшей модели канала с диффузно рассеивающими границами, в котором формируется

течение Пуазейля и сопротивление определяется вязкостью [1]. Рассчитанная зависимость сопротивления от магнитного поля хорошо описывает данные опытов. Было показано, что высокочастотный коэффициент вязкости имеет резонанс на удвоенной циклотронной частоте и выдвинута гипотеза, что обнаруженный в опытах пик в полевой зависимости фотосопротивления сверхчистых образцов связан с этим резонансом [2].

Гидродинамика двухкомпонентных систем.

Предсказано положительное ненасыщающееся линейное магнетосопротивление в двухкомпонентной (электрон-дырочной) системе, связанное с формированием вдоль границ образца узких областей, в которых происходит рекомбинация/генерация поперечных потоков и которые вносят главный вклад в продольный ток (рис. 1а). Этот эффект был описан [3]. Изучено магнетосопротивление такой же системы с учетом вязкости каждой из компонент жидкости [4]. Было показано, что, в зависимости от ширины образца, сопротивление как функция магнитного поля из-за конкуренции рекомбинационного и вязкостного механизмов может оказаться как монотонно возрастающей, так и немонотонной, включающей участки падения и последующего роста. В случае достаточно быстрой рекомбинации может возникнуть особое состояние, когда образец разбивается на домены, в которых ток направлен вдоль и против приложенного электрического поля (рис. 1б). Были выведены гидродинамические уравнения для графена, линейность энергетического спектра в котором требует существенной модификации обычной гидродинамики, в особенности в окрестности дираковской точки. Было показано, что в этой области качественно изменяется спектр коллективных возбуждений — плазменных и звуковых волн, при этом локальное возмущение энергии «рассасывается»





Рисунок 1. (а) Распределение потоков электронов *j_e* и дырок *j_h* в двухкомпонентной системе; (б) Распределение плотности тока (черная кривая) в чистом образце, синим обозначены области противотока [4].

значительно быстрее возмущения заряда. Полученные результаты суммированы в обзоре [5].

Гидродинамика плазменных систем.

Предсказано возникновение индуцированной постоянным током гидродинамической неустойчивости в плазменном кристалле, состоящем из чередующихся в направлении тока (ось х) областей с разными скоростями плазменных волн, s₁ > s₂. При промежуточных скоростях потока, s, >V, > s, происходит раскачка плазменных волн и, как следствие, генерация излучения на терагерцовой частоте. Изучен отклик плазменного кристалла на циркулярно поляризованное излучение. В случае асимметричной ячейки, вдоль оси х генерируется постоянный ток J,, т.е. имеет место так называемый «эффект храповика» (подробнее см. в статье Белькова и др. в этом сборнике). Одновременно возникает эффективная «оптическая сила Лоренца», создающая поперечный ток Ј., Предсказано гигантское, на два-три порядка, усиление эффекта храповика в окрестности плазменного резонанса, при этом $J_{y} >> J_{y}$. Показано, что циркулярно поляризованная волна может возбуждать в нанокольцах постоянный ток и вблизи плазменного резонанса приводить к гигантскому обратному эффекту Фарадея [6]. С усилением мощности

излучения плазменные возбуждения эволюционируют в гидродинамические кинки и солитоны, генерирующие перестраиваемое излучение, в том числе в терагерцовом диапазоне.

- P. S. Alekseev, Negative Magnetoresistance in Viscous Flow of Two-Dimensional Electrons, Phys. Rev. Lett. 117, 166601 (2016).
- P. S. Alekseev, A magnetic resonance in high-frequency viscosity of two-dimensional electrons, arXiv:1802.09179 (2018).
- G.Yu. Vasileva, D. Smirnov, Yu.L. Ivanov, Yu.B. Vasilyev, P.S. Alekseev, A. P. Dmitriev, I. V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, M. Titov, B. N. Narozhny, and R. J. Haug, Linear magnetoresistance in compensated graphene bilayer, Phys. Rev. B 93, 195430 (2016).
- P.S. Alekseev, A. P. Dmitriev, I. V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, B. N. Narozhny, and M. Titov, Nonmonotonic magnetoresistance of a two-dimensional viscous electron-hole fluid in a confined geometry, Phys. Rev. B 97, 085109 (2018); Counterflows in viscous electronhole fluid, arXiv:1805.10321 (2018) (Phys. Rev. B, в печати).
- B.N. Narozhny, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin, and J. Schmalian, Hydrodynamic Approach to Electronic Transport in Graphene, Annalen der Physik 529, 1700043 (2017).
- K. L. Koshelev, V.Yu. Kachorovskii, M. Titov, and M. S. Shur, Plasmonic shock waves and solitons in a nanoring, Phys. Rev. B 95, 035418 (2017)

ЭФФЕКТЫ ХРАПОВИКА В СТРУКТУРАХ С ЛАТЕРАЛЬНОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ

Базовые подразделения: сектор Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле, лаборатория Нелинейных оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках

Периодические структуры без центра инверсии обладают неотъемлемым, фундаментальным свойством: в них возникают направленные макроскопические потоки частиц при воздействии на эти частицы переменной силы, среднее значение которой равно нулю. Первоначально эффектом храповика, или рэтчет-эффектом, называлось возникновение направленного вращения асимметричного твердого тела под действием периодического вращательного момента. В настоящее время это понятие включает широкий круг явлений в твердотельных средах, джозефсоновских контактах, жидкостях, биологических и химических системах, и даже в экономике. В общем случае под эффектом электронного храповика понимается возникновение направленного движения заряженных частиц, электронов или дырок, в пространственно периодической, нецентросимметричной системе под действием переменной силы с нулевым средним значением. Если отсутствие центра инверсии обусловлено



Рисунок 1. Схематическое изображение электронного храповика в виде двумерного канала (окрашенная плоскость) с асимметричным металлическим затвором. d — период решетки. Падающее по нормали излучение представлено винтовой линией. Жёлтой стрелкой показано направление индуцированного в двумерном канале фототока.

микроскопической структурой системы, то направленный нелинейный транспорт обычно связывают с фотогальваническим (или фотовольтаическим) эффектом. Об электронном храповике (или рэтчете) говорят, когда речь идет об искусственно приготовленных нецентросимметричных периодических объектах.

В Институте были исследованы, теоретически и экспериментально, эффекты электронного храповика в структурах с квантовыми ямами и структурах на основе графена, на покрывающий слой которых была нанесена асимметричная решетка из металлических полосок, т.е. изучался фототок в двумерном канале с периодическим асимметричным металлическим затвором [1-5]. Наличие решетки приводит к двоякому эффекту: 1) создает одномерный периодический электростатический потенциал V(x), действующий на носители заряда в двумерном канале, и 2) вызывает периодическую модуляцию терагерцового электрического поля E(x), обусловленную ближнеполевой дифракцией падающей на структуру электромагнитной волны. При слабом потенциале V(x) и малой интенсивности излучения стационарный фототок пропорционален усредненному по координате x произведению $\Xi = \langle E2(x) \rangle$ dV(x)/dx. Асимметрия решетки приводит к сдвигу фаз между периодическими функциями V(x) и E(x), а значит к ненулевому значению Е и фототока.

Установлены три механизма рэтчет-эффекта. Один из них, получивший название храповика Зеебека (Seebeck ratchet) и возникающий при возбуждении неполяризованным излучением, — это разогрев электронного газа. Модулированное вдоль оси *х* ближнее поле, действуя на двумерные носители, разогревает их и приводит к периодическому изменению их эффективной температуры *T*(*x*). Ток храповика Зеебека был рассчитан и измерен в системах как на основе



Рисунок 2. Зависимость фототока от внешнего магнитного поля, рассчитанная для структуры с квантовой ямой (Cd,Mn)Те для трех различных температур. Синие и красные кривые представляют результаты расчета для структур с равными по модулю, но противоположными по знаку параметрами асимметрии Ξ. Амплитуда осцилляций намного превышает значение фототока в нулевом магнитном поле (последнее не видно в выбранном масштабе). Из 4.

квантовых ям, так и на основе графена. Помимо разогревного механизма, при поглощении поляризованного излучения возникают фототоки, инвертирующие своё направление при смене знака круговой поляризации или при вращении плоскости линейной поляризации падающего излучения. Такие эффекты получили название циркулярного и линейного храповиков.

Разогрев вырожденного газа высокочастотным излучением намного более эффективен в квантующем магнитном поле, когда имеет место режим шубниковских осцилляций проводимости. Это связано с тем, что даже слабый разогрев электронного газа приводит к резкому подавлению осциллирующей поправки к проводимости. Поэтому фототок с ростом магнитного поля значительно усиливается. Эффект магнитного храповика (его можно назвать храповиком Нернста– Эттингсгаузена) был в ФТИ предсказан, обнаружен и исследован. Фототок в квантующем магнитном поле на несколько порядков величины превосходит значение в нулевом поле. Результаты соответствующего расчёта приведены на рис. 2. Измерения, представленные в работе [4] проводились на полумагнитных структурах с гигантским зеемановским расщеплением, поэтому в фототоке при низкой температуре обнаружены биения, которые хорошо описываются в теории. Синие и красные кривые на рис. 2 соответствуют двум структурам с одинаковым по модулю, но противоположным по знаку параметром асимметрии *Ξ*, который можно было регулировать в условиях эксперимента.

- G. V. Budkin and L. E. Golub, Orbital magnetic ratchet effect, Phys. Rev. B 90, 125316 (2014).
- P. Olbrich, J. Kamann, M. König, J. Munzert, L. Tutsch, J. Eroms, D. Weiss, M.-H. Liu, L. E. Golub, E. L. Ivchenko, V. V. Popov, D. V. Fateev, K. V. Mashinsky, F. Fromm, Th. Seyller, and S. D. Ganichev, Terahertz ratchet effects in graphene with a lateral superlattice, Phys. Rev. B 93, 075422 (2016).
- Г. В. Будкин, Л. Е. Голуб, Е. Л. Ивченко, С. Д. Ганичев, Эффекты магнитного храповика в двумерном электронном газе, Письма в ЖЭТФ 104, 662 (2016).
- P. Faltermeier, G. V. Budkin, J. Unverzagt, S. Hubmann, A. Pfaller, V. V. Bel'kov, L. E. Golub, E. L. Ivchenko, Z. Adamus, G. Karczewski, T. Wojtowicz, V. V. Popov, D. V. Fateev, D. A. Kozlov, D. Weiss, and S. D. Ganichev, Magnetic quantum ratchet effect in (Cd,Mn) Te – and CdTe-based quantum well structures with a lateral asymmetric superlattice, Phys. Rev. B 95, 155442 (2017).
- P. Faltermeier, G. V. Budkin, S. Hubmann, V. V. Bel'kov, L. E. Golub, E. L. Ivchenko, Z. Adamus, G. Karczewski, T. Wojtowicz, D. A. Kozlov, D. Weiss, and S. D. Ganichev, Circular and linear magnetic quantum ratchet effects in dual-grating-gate CdTe-based nanostructures, Physica E 101, 178 (2018).

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Базовое подразделение — сектор Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках

Эффект Холла в магнитных материалах помимо нормального вклада, обусловленного действием силы Лоренца на электроны проводимости, приобретает вклады, связанные с намагниченностью. При наличии в материале спин-орбитального взаимодействия возникает аномальный эффект Холла пропорциональный средней макроскопической намагниченности образца. Объектом современных исследований в этом контексте являются системы со сложной пространственной текстурой намагниченности, такие как доменные стенки и магнитные скирмионы [см. обзор А. Fert и др., Nature Reviews Materials 2, 17301 (2017)]. Недавние эксперименты в таких системах открыли существование дополнительного вклада в холловское сопротивление (топологический эффект Холла), который возникает в результате обменного взаимодействия носителей заряда с областями, в которых пространственное распределение намагниченности носит вихревой характер и является киральным [Phys. Rev. Lett. 83, 3737 (1999)]. Эффект вызывает большой интерес, поскольку может быть использован как инструмент электрического детектирования киральных конфигураций намагниченности, в том числе в так называемой «беговой памяти» (в англоязычной литературе — racetrack memory).

Микроскопический механизм влияния спиновой киральности на электрической ток состоит в том, что рассеяние электронов проводимости на киральных магнитных текстурах оказывается асимметричным. В Институте был теоретически исследован топологический эффект Холла в режиме баллистического взаимодействия носителей заряда с киральными спиновыми текстурами (где нет рассеяния на немагнитных примесях внутри текстуры) и открыт ряд нетривиальных свойств топологического эффекта Холла, ранее не обсуждавшихся в литературе [1]. Разработанная теория топологического эффекта Холла основана на точном решении задачи о спин-зависимом рассеянии электрона на локализованном киральном поле намагниченности. Анализ показывает, что в зависимости от того, разрешены или подавлены процессы рассеяние электрона с переворотом спина (спин-флип рассеяние), реалиуются качественно различные режимы топологического эффекта Холла. Интенсивность процессов с переворотом спина зависит от адиабатическиго параметра λ, характеризующего отношение времени пролета носителя заряда через область киральной спиновой текстуры ко времени перехода между состояниями с противоположными проекциями спина: спин-флип рассеяние активировано при λ_≤1 и подавлено при λ₂≥1. На рис. 1 схематично показаны разные режимы топологического эффекта Холла на примере рассеяния электрона на магнитном скирмионе. В случае, когда спин-флип рассеяние подавлено ($\lambda_{2} \gg 1$), спин электрона проводимости адиабатически следует за локальным направлением намагниченности, при этом оказывается, что электроны с противоположной



Рисунок 1. Режимы асимметричного рассеяния электрона на магнитном скирмионе. В режиме слабой связи (спин-флип процессы активированы λ_а≪1 возникает поперечный зарядовый ток, а в режиме сильной связи (спин-флип процессы адиабатически подавлены) λ_а≫1имеет место спиновый эффект Холла.

проекцией спина на ось, перпендикулярную плоскости движения, рассеиваются в разных поперечных направлениях (рис. 1, правая панель). Такая картина асимметричного рассеяния приводит к спиновому эффекту Холла. В этом режиме электрический поперечный отклик возникает лишь в меру спиновой поляризации носителей. В противоположном случае λ <<1 процессы переворота спина электрона играют ключевую роль для возникновения асимметричного рассеяния. В этом режиме вне зависимости от начального спинового состояния электроны преимущественно рассеиваются в одном и том же поперечном направлении (см. левую панель рис. 1), которое определяется ориентацией спиновой текстуры [4]. При этом поперечный электрический отклик возникает даже для неполяризованного по спину электронного газа, аналогично обычному эффекту Холла.

Существование двух различных режимов имеет существенное значения для понимания эволюции топологического эффекта Холла при изменении параметров спиновых текстур в эксперименте. Например, при увеличении размера скирмиона возрастает время пролета электрона через его структуру, что сопровождается увеличением адиабатического параметра, т.е. происходит переход между зарядовым и спиновым



Рисунок 2. Кроссовер между зарядовым и спиновым режимами топологического эффекта Холла.

режимами топологического эффекта Холла. На рис. 2 представлена типичная зависимость вклада в поперечное сопротивление, связанного с топологическим эффектом Холла ρ_{vx}^{T} от диаметра магнитного скирмиона а в двумерной системе со случайно расположенными магнитными скирмионами и зарядовыми примесями. Зарядовый р и спиновый вклады р учитываются в полном холловском сопротивлении независимо р^т_и=р_с+р_а. При увеличении размера (в безразмерных единицах ka, где k — волновой вектор электрона) происходит переход между двумя режимами, при этом полное сопротивление демонстрирует немонотонную зависимость с минимумом. Возникновение минимума легко понять анализируя роль процессов рассеяния электрона с переворотом спина. Поскольку зарядовый вклад р возникает в результате интерференции процессов с переворотом спина, то при увеличении размера скирмиона первичный рост, обусловленный размерным эффектом, сменяется умешьшением, связаным с подавлением спин-флип рассеяния. При этом адиабатический вклад р активируется не сразу, а лишь когда спин-флип процессы подавлены в достаточной мере, т.е. при больших размерах скирмиона. В результате холловское сопротивление р^т немонотонно зависит от размера скирмиона.

Другим важным результатом разработанной теории является вывод о существовании асимметрии обменного рассеяния электронов на киральных спиновых текстурах с нулевым топологическим зарядом. Ранние теории топологического эффекта Холла, основанные на приближении среднего поля и применимые для плотных киральных систем типа решетки скирмионов, связывали это явление с топологическим зарядом поля намагниченности. Однако, наш анализ показывает, что в неупорядоченных системах ключевую роль для появления топологического эффекта играет не топологическая структура намагниченности, а локально ненулевая киральность спиновой текстуры. Таким образом, это явление следовало бы называть киральным (а не топологическим) эффектом Холла. Было показано, что топологический эффект Холла возможен в гораздо более широком классе магнитных систем, а не только в материалах с топологически нетривиальными спиновыми текстурами, такими как магнитные скирмионы. В частности, флуктуации намагниченности в системах со спин-орбитальным взаимодействием и магнитные поляроны в полупроводниковых системах также должны приводить к асимметричному рассеянию носителей заряда и, следовательно, к наблюдаемому топологическому эффекту Холла.

Публикации

- K.S. Denisov, I.V. Rozhansky, N.S. Averkiev, E. Lähderanta, A nontrivial crossover in topological Hall effect regimes, Sci.Rep. 7 17204 (2017).
- K.S. Denisov, I.V. Rozhansky, N.S. Averkiev, E. Lähderanta, Electron Scattering on a Magnetic Skyrmion in the Nonadiabatic Approximation, Phys. Rev. Lett. 117 027202 (2016).

КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ И ГРАФЕНЕ

Базовое подразделение —сектор Теоретических основ микроэлектроники

С помощью методов теоретической физики и компьютерного моделирования исследовано влияние электрон-фононного взаимодействия на температурные зависимости целочисленного квантового эффекта Холла (КЭХ) в наноструктурах с квантовыми точками и графене с целью выявления объектов, в которых можно значительно смягчить условия наблюдения КЭХ по температуре и магнитным полям по сравнению с обычно используемыми квантовыми ямами.

Для описания КЭХ разработана модель, в которой учтено влияние электрон-фононного взаимодействия на процессы переноса между локализованными состояниями, формирующимися в условиях сильных магнитных полей при наличии потенциального поля, которое может быть как случайной природы (примеси, дефекты, неоднородности состава), так и детерминированной (квантовые точки или антиточки). «Лакмусовой бумажкой», определяющей адекватность той или иной модели КЭХ, служит предсказываемая ею зависимость ширин переходных областей между соседними плато проводимости от температуры. В пределе низких температур эта зависимость – степенная, и удалось воспроизвести экспериментально наблюдаемый для квантовых ям показатель степени k≈0.4 [1]. В [2] показано, что условия локализации носителей в системах квантовых точек благоприятствуют наблюдению КЭХ при более высоких температурах, чем в квантовых ямах. На рис. 1 показана эволюция картины КЭХ, т.е. зависимостей холловской проводимости от фактора заполнения n с температурой для квантовых ям (a) и квантовых точек (b), демонстрирующая существенное преимущество последних. Однако, для практической реализации КЭХ при повышенных температурах требуются системы квантовых точек с контролируемыми характеристиками: оптимальным размером и концентрацией, умеренными флуктуациями геометрии и состава, по возможности упорядоченные, при этом более предпочтительными оказываются квантовые антиточки. Также теоретически исследован высокотемпературный КЭХ в графене, с учетом двумерной природы как электронных, так и фононных возбуждений [3]. Показано, что двумерный характер электрон-фононного взаимодействия в условиях сильного магнитного поля устанавливает порог



Рисунок 1. Эволюция картины плато КЭХ с температурой (56, 40, 28, 20, 14К) для а – квантовой ямы, b – упорядоченного массива квантовых точек

для энергии излучаемых/поглощаемых фононов, тем самым уменьшая долю электронных состояний, вовлеченных в процесс перколяции. Число таких состояний оказывается пропорциональным корню из магнитного поля, а не температуре, поэтому в достаточно сильном магнитном поле перколяционный порог вообще перестает зависеть от температуры.

Публикации

 А.А. Грешнов, Я.М. Бельтюков, О влиянии электрон-фононного взаимодействия на температурные зависимости магнетотранспорта в квантово-холловских системах, ФТП 48, 242 (2014).

- Я. М. Бельтюков, А. А. Грешнов, Квантовый эффект Холла в полупроводниковых системах с квантовыми точками и антиточками, ФТП 49, 494 (2015).
- А. А. Грешнов, О роли двумерных фононов в возможности наблюдения квантового эффекта Холла в графене при комнатной температуре, Письма ЖЭТФ 100, 577 (2014).

ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА АККУМУЛЯЦИОННОГО СЛОЯ В SRTIO,.

Базовое подразделение – лаборатория Физики кластерных структур

Перовскиты со структурой ABO₃ обладают интригующими магнитными, сверхпроводящими и мультиферроидными свойствами. Среди таких материалов особое внимание уделяется гетероструктурам на основе SrTiO₃, полупроводника с гигантской диэлектрической постоянной, достигающей к≈10⁴ при гелиевых температурах. В таких гетероструктурах (например, GdTiO₃/SrTiO₃) на границе раздела возникает аккумуляционный слой электронов. Подвижные электроны с концентрацией N≈10¹⁴ см⁻² находятся в SrTiO₃, уравновешивающий их положительный заряд ионов находится в GdTiO₃.

Прежде всего, в работах [1,2] был решён вопрос о распределении электронов в аккумуляционном слое. Электронный газ при таких больших концентрациях вырожденный, поэтому можно применять приближение Томаса-Ферми. В случае линейного диэлектрического отклика подобная задача решена Я.И. Френкелем (1928 г.) и показано, что концентрация электронов n(x) спадает с расстоянием от поверхности х как n(x)~(x+d)⁻⁶, d —ширина электронного газа находится из условия нейтральности n(d)d ≈ N. Однако, изза большого значения к в SrTiO₃, необходимо учитывать нелинейный диэлектрический отклик. Используя



гамильтониан Гинзбурга-Ландау мы получили $n(x) \sim (x+d)^{-12/7}$, где d определяется условием нейтральности, приведенным выше. Это означает, что концентрация электронов спадает с расстоянием существенно слабее, чем в модели Френкеля, и большая часть электронов находится в хвосте распределения при x > d, вдали от границы.

Основным механизмом рассеяния в исследуемых кристаллах SrTiO₃ является рассеяние на границе гетероперехода, то есть рассеиваются только те электроны, которые долетают до поверхности. В модели Френкеля основной вклад в проводимость и другие кинетические коэффициенты дают электроны на расстоянии d от границы раздела. Однако, было показано, что в SrTiO₂, основной вклад в кинетические коэффициенты дают «убегающие» электроны из хвоста распределения, т.е. наиболее удаленные от гетерограницы. Этот вклад расходится, а естественным ограничением для такого вклада является толщина плёнки SrTiO₃ – L. Мы показали, что в этом случае проводимость слоя растёт как L^{6/7}, коэффициент Зеебека ~ L^{8/7}, магнитосопротивление ~ L^{22/7}. В работе [3] был также рассчитан холловский фактор для таких структур в сильных полях, обсуждены различные ограничения на вклад электронов из хвоста распределения.

- K. V. Reich, M. Schecter and B. I. Shklovskii. Accumulation, inversion, and depletion layers in SrTiO₃. Phys. Rev. B 91, 115303 (2015)
- Han Fu, K. V. Reich and B. I. Shklovskii. Collapse of electrons to a donor cluster in SrTiO₃. Phys. Rev. B 92, 035204 (2015)
- Han Fu, K. V. Reich and B. I. Shklovskii. Anomalous conductivity, Hall factor, magnetoresistance, and thermopower of accumulation layer in SrTiO₃. Phys. Rev. B 94, 045310 (2016)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СВЕРХБЫСТРОГО ЛАВИННОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С РN ПЕРЕХОДАМИ И ОБЪЕМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Базовое подразделение — лаборатория Мощных полупроводниковых приборов

Инициируемый быстронарастающим высоковольтным импульсом динамический лавинный пробой полупроводниковых структур качественно отличается от классической картины стационарного лавинного пробоя. В полупроводниковых структурах на основе Si и GaAs с высоковольтными p-n переходами происходит так называемый задержанный лавинный пробой (открыт И.В. Греховым и А.Ф. Кардо-Сысоевым в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 1979 г.): сверхбыстрое (100 пс) переключение обратносмещенной структуры в проводящее состояние, начинающееся при достижении примерно удвоенного напряжения стационарного пробоя [1,2]. Работающие на этом физическом принципе кремниевые диоды и динисторы нашли важные применения в импульсной электронике [3]. Недавно в лаборатории мощных полупроводниковых приборов ФТИ было экспериментально установлено, что сверхбыстрое высоковольтное лавинное переключение возможно также в Si n⁺nn⁺ структурах и ZnSe объемных образцах с омическим контактами большой площади [4,5]. Эксперименты [4,5] показывают, что инициированная высоковольтным быстронарастающим импульсом лавинная ионизация представляет собой метод субнаносекундной генерации неравновесной электроннодырочной плазмы, область применимости которого не ограничена структурами с pn переходами и включает объемные полупроводники, в том числе перспективные для оптоэлектроники прямозонные материалы с большой шириной запрещенной зоны.



Рисунок 1 – Динамика электрического поля в п базе Si p*nn* (a) и n*nn* структуры (b) при сверхбыстром лавинном переключении, инициированном быстронарастающим высоковольтным импульсом. Показаны профили легирования и напряжение на структурах. Моделирование проведено с помощью TCAD SILVACO. Как в случае структур с pn переходами, так `и в случае n*nn* структур и объемных образцов, время переключения (100150 пс) на порядок меньше, чем время пролета носителя заряда (~1 нс) через базу структуры типичной толщиной W=100200 мкм. Это указывает на необычный механизм модуляции проводимости. С помощью численного моделирования показано, что, несмотря на общее сходство переходных характеристик, пространственно-временная динамика сверхбыстрого заполнения прибора проводящей плазмой для p*nn* и n*nn* структур оказывается совершенно различной.

Распределение электрического поля в p⁺nn⁺ структуре на этапе роста напряжения (Рис.1a, t < 6.9 нс) задано объемным зарядом примеси в обедненной части рп перехода и резко неоднородно в пространстве. В момент начала переключения максимальная напряженность поля ~340 кВ/см, значительно превосходящая порог ударной ионизации в Si, достигается на рп переходе. Напротив, в n⁺nn⁺ структуре электрическое поле нарастает практически однородно во всем n слое (Рис.1b) и в момент начала переключения t ≈ 2.46 нс достигает порога ионизации E_{th} ≈ 200 кВ/ см. Однородность распределения поля в n*nn* структуре обусловлена формированием двух узких слоев пространственного заряда: отрицательно заряженного слоя инжектированных электронов на левом крае n базы и положительного слоя примеси в правом n⁺ слое (Рис. 1b). Динамическое формирование этих заряженных областей объясняет возможность достижения сильных полей в образцах без p-n переходов, не обладающих блокирующей способностью. Оно требует существенно большей (>20 кВ/нс) скорости подъема приложенного напряжения, чем это необходимо для диодной структуры (~5 кВ/нс на Рис.1а).

Сверхбыстрое переключение р*nn* структуры принципиально неоднородно в пространстве: через n базу пробегает сверхбыстрый фронт ударной ионизации (Рис. 1а, 6.9 нс < t < 7.1 нс), заполняющий структуру электронно-дырочной плазмой с концентрацией N ≈ 10¹⁶ см⁻³. Время переключения $\Delta t = W/v_f$ определяется скоростью пробега фронта ионизации v, ≈ 5v, величина которой в несколько раз превосходит насыщенную скорость носителей v_s ≈ 10⁷ см/с. Напротив, в n⁺nn⁺ структуре (Рис. 1b) лавинное переключение происходит практически однородно. Отличное согласие результатов экспериментов и одномерного численного моделирования [4, 5] указывает на однородность процесса по площади n⁺nn⁺ структуры, т.е. лавинное переключение происходит одновременно во всем ее объеме. Время переключения определяется модифицированным временем максвелловской релаксации $\Delta t \approx \epsilon \epsilon_0 E_{th}/2eNv_s \approx 100$ пс, которое соответствует времени разрядки заряженных слоев структуры через созданную ударной ионизцией электронно-дырочную плазму концентрацией N≈10¹⁵ см⁻³.

Описанное выше пространственно-однородное субнаносекундное лавинное переключение образцов с омическим контактами большой площади качественно отличается от стримерного пробоя в ударно-ионизационных лазерах на основе ZnSe структур с точечным контактом [Г.А. Месяц и др., ЖЭТФ 133, 1162 (2008)], в которых пробой инициируется сверхвысоковольтным (20250 кВ) субнаносекундным импульсом напряжения. Практические применения однородного лавинного переключения структур без рп переходов [4,5] для создания импульсных ударноионизационных лазеров требуют поиска путей увеличения концентрации генерируемой плазмы.

- V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Rozhkov, P. Brunkov, P. Rodin, I. Grekhov, Picosecond Range Avalanche Switching of High-Voltage Diodes: Si vs. GaAs Structures, IEEE Trans. on Plasma Science 44, 1941 (2016).
- V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Gutkin, P. Brunkov, P. Rodin, I. Grekhov, Delayed avalanche breakdown of high-voltage silicon diodes: various structures exhibit different picosecond-range switching behavior, J. Appl. Phys. 122, 185701 (2017).
- 3. I.V. Grekhov, Pulse power generation by means of ionizing fronts

in semiconductors: the state of the art and future prospectives, IEEE Trans. on Plasma Science 38, 1118 (2010).

- В.И. Брылевский, И.А. Смирнова, Н.И. Подольская, Ю.А. Жарова, П.Б. Родин, И.В. Грехов, Экспериментальное наблюдение задержанного ударно-ионизационного пробоя полупроводниковых структур без p-n переходов, *Письма в ЖТФ 44, 66 (2018)*.
- V. Brylevskiy, I. Smirnova, N. Podolska, Y. Zharova, P. Rodin and I. Grekhov, Picosecond Range Avalanche Switching of Bulk Semiconductors Triggered by Steep High Voltage Pulses, IEEE Trans. on Plasma Science (Special Issue on Pulsed Power Science and Technology), 2018, в печати.

ТЕОРИЯ ЭКСИТОНОВ И ТРИОНОВ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Базовое подразделение — сектор Теоретических основ микроэлектроники

Электрон-дырочные комплексы — экситоны (пара электрона и дырки, связанная кулоновским взаимодействием), биэкситоны (экситонные молекулы), трионы (трехчастичные комплексы из пары одинаковых носителей заряда и неспаренного носителя заряда противоположного знака) во многом определяют оптические свойства полупроводников и низкоразмерных систем на их основе вблизи края фундаментального поглощения. Это определяет важность теоретических исследований экситонов и их комплексов для физики полупроводников. Ключевой характеристикой кулоновских комплексов является энергия связи. Для ее расчета могут быть использованы множество методов, такие как расчеты из первых принципов, метод квантового Монте-Карло, а также вариационный метод. Последний показал себя удачным компромиссом между точностью получаемого результата и вычислительными затратами, особенно если речь идет о расчете основного состояния изучаемой системы. Суть вариационного метода состоит в том, что гамильтониан системы усредняется на волновой функции, зависящей от нескольких параметров. В таким случае приближенное значение энергии системы является функцией этих параметров, и минимизация полученного

функционала позволяет приблизится к истинному значению энергии основного состояния. Удачно выбранная форма пробной функции даже позволяет делать качественные выводы о свойствах системы в зависимости от ее внешних параметров. Выбор пробной функции является в некотором смысле искусством, при этом руководствуются физическими соображениями о строении системы. Выбор числа подгоночных параметров также основывается на балансе между точностью и сложностью расчета, излишнее количество может даже навредит так как есть вероятность нахождения локального, а не глобального минимума функционала энергии.

Начало теоретических исследования энергетического спектра и строения электрон-дырочных комплексов в наноструктурах было положено в 2000 году работой Р.А. Сергеева и Р.А. Суриса, посвященной исследованию трионов в квантовых ямах [1]. Была предложена пробная функция всего с шестью подгоночными параметрами, позволяющая вычислить энергию связи основного состояния обоих типов трионов во всем диапазоне отношения эффективных масс электрона и дырки. Особенностью предложенной пробной функции состоит в том, что ее строение отражает структуру триона в предельных случаях (когда один из носителей заряда значительно тяжелее другого) и плавно интерполирует между ними при изменении подгоночных параметров. Точность метода была подтверждена сопоставлением с численными расчетами, использующими пробные функции с сотнями и тысячами подгоночных параметров. На основе пробной функции из [1] была предложена волновая функция для расчета энергии связи возбужденного (триплетного) состояния Х⁺-триона, которое оказывается связанным при отношении масс электрона и дырки меньше некоторого критического значения, в то время как Х⁻трион (в случае, если электрон легче дырки) связанного возбужденного состояния не имеет.

Развитый метод был обобщен на случай трионов в квантовых проволоках, системах, в которых движение носителей заряда ограничено в двух направлениях и свободно в третьем. Особенностью квазиодномерного случая является отсутствие строго одномерного предела, так как величина кулоновского взаимодействия логарифмически расходится с уменьшением радиуса проволоки. При помощи оригинальных вариационных функций были вычислены зависимости энергии связи основного и возбужденного состояния трионов от отношения масс электрона и дырки, а также от радиуса квантовой проволоки [3].

Как известно в реальных полупроводниковых системах: квантовых ямах и квантовых проволоках, существуют неоднородности ширины (радиуса), которые могут приводить к дополнительной локализации экситонов и трионов. В работе 4.был предложен общий метод построения вариационных функций для вычисления энергии связи экситонных комплексов на неоднородностях интерфейсов квантовых ям. Важным моментом является конкуренция между кулоновским взаимодействием между носителями заряда и их локализацией на неоднородности. Можно выделить следующие предельные случаи: доминирует локализация на неоднородности для обоих типов носителей заряда, тогда они локализуются независимо. и кулоновское взаимодействие можно рассматривать как возмущение; для одного типа носителей заряда доминирует кулоновское взаимодействие, тогда применимо адиабатическое приближение; для обоих типов носителей заряда доминирует кулоновское взаимодействие, тогда комплекс локализуется как единое целое. Предложенная в [4] пробная функция позволяет вычислить энергию связи комплекса не хуже второго порядка теории возмущений в предельных случаях и плавно интерполирует между ними при изменении подгоночных параметров. В работе 5. она была использована для вычисления энергии связи трионов, локализованных на неоднородностях интерфейсов квантовых ям. Аналогичная функция была построена и для экситонов и трионов, локализованных на неоднородностях квантовых проволок [6].

Естественным развитием метода явился учет сложной структуры валентной зоны, характерной для полупроводников III-V и II-VI. Локализация в квантовых ямах меняет структуру многокомпонентной волновой функции дырки и может приводить к изменению эффективных масс носителей заряда. В работе 7. был рассмотрен наиболее простой пример дырки, локализованной на акцепторе. Было продемонстрировано, что с одной стороны, локализация усиливает кулоновское взаимодействие, а с другой, наблюдается уменьшение эффективной массы дырки. Это, в некоторых случаях, может приводит к появлению немонотонной зависимости энергии связи акцептора от ширины квантовой ямы или от радиуса квантовой проволоки. Для вычисления энергии связи акцептора были предложены пробные функции, плавно интерполирующие между формами, отвечающими предельным случаям объемного акцептора и узкой квантовой ямы (квантовой проволоки малого радиуса).



Рисунок 1 – Энергия связи основного состояния положительно заряженного (X* symm) и отрицательно заряженного (X – symm) триона в монослое WSe2, рассчитанная с учетом диэлектрического экранирования (радиус экранирования r₀=4 nm) в зависимости от отношения масс электрона и дырки. Красные круги показывают энергию связи возбужденного (антисимметричного или «триплетного») триона в зависимости от отношения масс. Этот состояние стабильно при m_e/m_h<0.5. Расчет выполнен вариационным методом с использованием оригинальных пробных функций. Из [9].

В последние несколько лет разработанные в Институте методы нашли применение для расчета энергии связи экситонов и трионов в монослоях дихалькогенидов переходных металлов: MoS₂, WSe₂ и подобных [8-10]. Такие двумерные полупроводники в последнее время вызывают большой интерес исследователей сильными кулоновскими эффектами и необычной многодолинной структурой энергетических зон. Еще одной важной особенностью этих двумерных кристаллов является необходимость учета контраста диэлектрических свойств монослоя и окружающей среды, что приводит к существенным отклонениям закона электрон-дырочного взаимодействия от кулоновского. Это приводит, в частности, к существенному отличию экситонной серии от водородоподобной: энергия связи экситона и сила осциллятора убывает с ростом номера уровня медленнее, чем для кулоновского потенциала.

Для расчета энергии связи экситонов и трионов был применен вариационный метод с пробными функциями, аналогичными, предложенным в [1]и [2]. Результаты расчетов приведены на рисунке 1, где показаны рассчитанные зависимости энергии связи основного и возбужденного состояния трионов от отношения эффективных масс электрона и дырки в монослое WSe... инкапсулированном в нитриде бора. Приведенная масса экситона и эффективный радиус экранировки взяты соответствующими WSe₂. Сравнение расчетами по методу квантового Монте-Карло и с данными эксперимента доказало применимость использованных пробных функций, а также помогло разгадать особенности тонкой структуры энергетического спектра трионов в двумерных кристаллах WSe₂. Недавно было выполнено моделирование ридберговских состояний экситона в закиси меди [11], полупроводнике, ставшем вновь популярным в последние годы благодаря возможности наблюдения в нем экситонов с главными квантовыми числами n до 25.



Рисунок 2 – Эволюция спектра поглощения при увеличении энергии Ферми F в единицах энергии связи экситона E_{av}. Из работы [12].

Также были проведены теоретические исследования многочастичных и коллективных явлений в экситонных системах. Была построена теория особенностей спектров оптического возбуждения трионов в квантовых ямах, содержащих электроны [12, 13]. Показано, что влияние фермиевского заполнения ям электронами приводит к появлению четырехчастичного комплекса «трион + дырка в ферми-море», энергия связи которого превышает энергию связи триона. Этот комплекс, названный впоследствии тетроном из-за того, что содержит 4 связанные частицы, проявляет себя как длинноволновый острый пик в спектре поглощения, рис. 2.



Рисунок 3 – Изменение спектра люминесценции экситонного газа в зависимости от концентрации для двух разных температур. Из [13].

Была предсказана возможность возникновения фазового перехода первого рода газ-кристалл (а точнее, структурированную жидкость) в разряженной системе диполярных экситонов в квантовых ямах [13]. Оказывается, что температура этого перехода при не слишком высоких концентрациях экситонов превышает температуру конденсации Бозе-Эйнштейна в идеальных квантовых ямах. В области сосуществования двух фаз появляются две линии люминесценции, одна из которых отвечает более плотной, а другая — разреженной фазе. Экспериментально похожее поведение было продемонстрировано в работах коллег из Института Вайцмана.

В работе 14.было показано, что беспорядок делает возможной «настоящую» Бозе-конденсацию с дальним порядком в двумерной системе. В этой работе также приведен детальный анализ роли конечного времени жизни бозонов и их взаимодействия в установлении корреляций между частицами.

- Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Энергия основного состояния X- – и X+-трионов в двумерной квантовой яме при произвольном отношении масс, ФТТ 43, 714 (2000).
- R. Sergeev and R. Suris, The Triplet State of X+ Trion in 2D Quantum Wells, physica status solidi (b) 227, 387 (2001).
- М. А. Семина, Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Энергия связи экситона и X+, X--трионов в одномерных системах, ФТП, 42, 1459 (2008).
- М. А. Семина, Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Локализация электронно-дырочных комплексов на флуктуациях интерфейсов квантовых ям, ФТП 11, 1373 (2006).
- M.A. Semina, R.A. Sergeev and R.A. Suris, Binding energies of 2D laterally-confined trions, Physica E 40, 1357 (2008).
- М. А. Семина, Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Простейшие электроннодырочные комплексы, локализованные на продольных флуктуациях квантовых проволок, ФТП 9, 1222 (2009).
- М. А. Семина, Р.А. Сурис, Влияние локализации в квантовых ямах и квантовых точках на смешивание тяжелых и легких дырок на энергию связи акцептора ФТП 7, 947 (2011).
- G. Wang, A. Chernikov, M. M. Glazov, T. F. Heinz, X. Marie, T. Amand, B. Urbaszek, Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides, Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018)
- 9. E. Courtade, M. Semina, et al., Charged excitons in monolayer

WSe2: Experiment and theory, Phys. Rev. B 96, 085302 (2017).

- C. Robert, M. A. Semina, et al., Optical spectroscopy of excited exciton states in MoS2 monolayers in van der Waals heterostructures, Phys. Rev. Materials 2, 011001(R) (2018).
- J. Thewes, J. Heckoetter, T. Kazimierczuk, M. Assmann, D. Froehlich, M. Bayer, M.A. Semina, and M.M. Glazov, Observation of High Angular Momentum Excitons in Cuprous Oxide, Phys. Rev. Lett. 115, 027402 (2015); М.А. Семина, Тонкая структура ридберговских экситонов в закиси меди, ФТТ 60, 1515 (2018).
- 12. R.A. Suris, Correlation between trion and hole in Fermi distribution in

process of trion photo-excitation in doped QWs, Optical Properties of 2D Systems with Interacting Electrons, Ed. by W. Ossau and R. Suris, NATO Scientific Series, Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 111-124.

- R. A. Suris (a), V. P. Kochereshko, G. V. Astakhov et al, Excitons and Trions Modified by Interaction with a Two-Dimensional Electron Gas, phys. stat. sol. (b) 227, 343 (2001).
- Р. А. Сурис, Фазовый переход газ-кристалл в двумерной системе диполярных экситонов, ЖЭТФ 149, 695 (2016).
- М. М. Глазов, Р. А. Сурис, Конденсация экситонов в двумерной системе с беспорядком, ЖЭТФ 153, 1001 (2018).

ПЛАЗМОН-ЭКСИТОННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ

Базовое подразделение – сектор Теории твердого тела

Теоретически изучались низкоразмерные плазмоны, экситоны и плазмон-экситоны в структурах металл-полупроводник и их проявления в оптических свойствах наноструктур.

Построена теория коллективных возбуждений, обусловленных сильной связью между дипольными поверхностными плазмонами металлических наночастиц в многослойных диэлектрических средах. На этой основе исследованы анизотропные плазмонные эффекты локального поля, обусловленные анизотропией частиц или/и образованных ими регулярных массивов. Предсказаны проявления этих эффектов в плазмонной спектроскопии и магнитооптике [1]. Выводы теории были подтверждены для систем In/InAs и Au/GaAs в работах, совместных с экспериментаторами лаборатории Оптики поверхности ФТИ; результаты составили основу нового метода плазмонной модуляционной спектроскопии анизотропного отражения света.

Другое важное направление исследований – разработка теории смешанных плазмон-экситонных возбуждений. Они обусловлены кулоновским взаимодействием локальных плазмонов наночастиц с квазидвумерными экситонами Ванье квантовых ям или с экситонами Френкеля молекулярных кристаллов. Теория плазмон-экситонов построена на основе метода функций Грина электромагнитной теории многократного резонансного рассеяния. Использована модель, в которой кулоновские моды плазмон-экситонов формируются близкорасположенными слоем металлических наночастиц и квантовой ямой.



Моды плазмон-экситонов, экспоненциально затухающие при удалении от структуры, можно связать с плазмон-экситонными комплексами. Такой комплекс образован дипольным плазмоном частицы в локальном поле, создаваемом плазмонами других частиц и темными экситонами квантовой ямы. Спектр эффективной поляризуемости плазмон-экситонного комплекса при фиксированной энергии экситона Е0 иллюстрируется нижним рисунком, который относится к частицам Ас и квантовой яме GaAs/AlGaAs. Вдали от резонанса плазмонный и экситонный спектры проявляются по-отдельности, а при резонансе возникает два одинаковых пика, разделенных узким и глубоким провалом. Зависимость положения спектральных максимумов при изменении энергии плазмона Ер (формы наночастиц) относительно Е0имеет признаки расщепления Раби для связанных осцилляторов (верхний рисунок). Такие же особенности предсказываются для спектров упругого рассеяния и отражения света в случаях соответственно отдельной частицы металла и слоя частиц, находящихся около квантовой ямы [2]. Подобный спектр отражения предсказан для периодических сверхрешеток с ячейками, состоящими из слоя металлических наночастиц и квантовой ямы [3]. В брэгговских сверхрешетках, период которых сравним с длиной волны света, спектр плазмон-экситонного отражения в зависимости от числа ячеек структуры показывает переход между сверхизлучательным и фотонно-кристаллическим режимами, но при существенно меньшем числе ячеек, чем в случае экситонных поляритонов. В настоящее время известно о наблюдении плазмон-экситонов в квантовой яме на основе ZnO с близким к ней монослоем алюминиевых нанодисков.

Публикации

- В.А. Кособукин. Анизотропные эффекты локального поля наночастиц в плазмонной оптике и магнитооптике. ФТТ 54, 2340 (2012).
- V.A. Kosobukin, Plasmon-exciton coupling in neighboring metal nanoparticles and a semiconductor quantum well: theory. Solid State Commun. 228, 43 (2016).
- В. А. Кособукин. Плазмон-экситонные поляритоны в сверхрешетках. ФТТ 59, 972 (2017).

ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИЯ, УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ И ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ: КВАНТОВЫХ ЯМАХ И КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Базовое подразделение – сектор Теоретических основ микроэлектроники

В Институте выполнен цикл работ по исследованию процессов Оже-рекомбинации, ударной ионизации и переноса энергии, проходящих в полупроводниковых наноструктурах. Разработана микроскопическая теория процесса Оже-рекомбинации в полупроводниковых гетероструктурах. Показано, что возможно существование двух новых механизмов Оже-рекомбинации: беспороговый и квазипороговый. Предложена микроскопическая теория прямого и обменного переноса энергии между квантовыми системами. Предложен механизм генерации чисто спиновых фототоков при оже-рекомбинации в условиях спин-орбитального расщепления Рашбы.

Механизмы, контролирующие время жизни в полупроводниковых наноструктурах определяют оптические и электронные свойства таких систем. Одним из важных механизмов рекомбинации в квантовых гетероструктурах является безызлучательная рекомбинация. К числу безызлучательных механизмов относится оже-рекомбинация, которая влияет как на время жизни неравновесных носителей заряда, так и на пороговые характеристики полупроводниковых гетеролазеров.

Был предсказан беспороговый канал оже-рекомбинации в гетероструктурах, выполнено детальное теоретическое описание беспорогового и квазипорогового процесса в гетероструктурах. Изучен процесс рекомбинации Оже в полупроводниковых квантовых точках. Показано значительное его усиление при малых радиусах квантовой точки. Предсказаны два новых механизма оже-рекомбинации в квантовой точке: беспороговый и квазипороговый. Предсказаны осцилляции суммарного коэффициента Оже в зависимости от радиуса и его немонотонную зависимость от температуры, а также уменьшение пороговой энергии при уменьшении радиуса квантовой точки. Показано, что при температуре около 4 К, при полном заселении основного уровня размерного квантования электронов и дырок, процесс оже-рекомбинации в квантовых точках подавлен.

Был изучен процесс безызлучательного резонансного переноса энергии в наноструктурах, являющийся сходным процессом с оже-рекомбинацией [1, 2]. Впервые получено аналитическое выражение для вероятности переноса по обменному механизму и показано, что на малых расстояниях между квантовыми точками им пренебрегать нельзя. Было дало объяснение механизма образования синглетного кислорода на поверхности нанопористого кремния в рамках обменного переноса энергии от нанопористого кремния к молекуле кислорода [3]. Показано, что существует оптимальное значение толщины стенки, при которой скорость генерации кислорода максимальна.

В ходе исследований по оже-рекомбинации в квантовых ямах было показано, что в глубоких квантовых ямах возможно подавление оже-процесса. Были подобраны оптимальные параметры, при которых резонансный оже-процесс значительно ослаблен. На основе этих результатов был предложен неоптический механизм генерации чисто спиновых токов, возникающих при оже-рекомбинации за счет спин-орбитального взаимодействия Рашбы [4]. Также было продемонстрировано, что в прямозонных полупроводниках с шириной запрещенной зоны <1 ÷ 1.5 эВ вклад в скорость ударной ионизации определяется вкладом, кубическим по отстройке от энергии порога [5]. Показано, что учет непараболичности энергетического спектра оказывает существенное влияние на температурную зависимость времени жизни в узкощелевых полупроводниках на основе твердых растворов типа Cd Hg, Te [6]. Для расчета спектра и волновых функций в гетероструктурах использована модель Кейна для прямозонных полупроводников и 14-зонная **кр**-модель модель для кремния. Вероятности и скорости Оже процессов можно вычислить с использованием первого порядка теории возмущений. Для расчета волновых функций молекулярного кислорода использован метод молекулярных орбиталей.

Результаты исследований могут быть применены для расчета и оптимизации лазерных структур на основе полупроводниковых наноструктур, содержащих квантовые ямы, нити и точки. Результаты также найдут применение для создания устройств спинтроники, для создания устройств, использующих эффект лавинного умножения в биологии и медицине, и для создания устройств на основе нанопористого кремния, эффективно генерирующих синглетный кислород.

- Д. М. Самосват, О. П. Чикалова-Лузина, Г. Г. Зегря, Безызлучательный резонансный перенос энергии между полупроводниковыми квантовыми точками, ЖЭТФ 148, 88 (2015).
- O. P. Chikalova-Luzina, D. M. Samosvat, V. M. Vyatkin, G. G. Zegrya, Resonant electronic excitation energy transfer by exchange mechanism in the quantum dot system, Superlattices Microstruct. 111, 166 (2017).
- Д. М. Самосват, О. П. Чикалова-Лузина, В. С. Хромов, А. Г. Зегря, Г. Г. Зегря, Механизм генерации синглетного кислорода в присутствии возбужденного нанопористого кремния, Письма ЖТФ 44, 53 (2018).
- А. Н. Афанасьев, А. А. Грешнов, Генерация чисто спиновых токов при оже-рекомбинации в квантовых ямах с расщеплением Рашбы, ЖЭТФ 148, 734 (2015).

 А. Н. Афанасьев, А. А. Грешнов, Г. Г. Зегря, О скорости ударной ионизации в прямозонных полупроводниках, Письма ЖЭТФ 105, 554 (2017). зависимость времени жизни носителей заряда в узкощелевых твердых растворах CdxHg1-xTe: учет оже-процессов, ФТП 49, 444 (2015).

6. Н. Л. Баженов, К. Д. Мынбаев, Г. Г. Зегря, Температурная

ОПТИЧЕСКИЕ СИЛЫ В НАНОФОТОНИКЕ И ПЛАЗМОНИКЕ

Базовое подразделение – сектор Теоретических основ микроэлектроники

Со времен Д.К. Максвелла хорошо известно, что энергия, импульс и момент импульса, переносимые светом, могут передаваться материальным объектам. Таким образом, свет может оказывать давление на тела или даже приводить их в движение. Механическое воздействие света на макроскопические объекты крайне незначительно и, чтобы его зарегистрировать, нужны прецизионные эксперименты, подобные тем, что в 1901 году проводил П.Н. Лебедев. На микромасштабах влияние оптических сил становится чрезвычайно важным. Так изобретенный А. Ашкиным в 70х годах прошлого века оптический пинцет сегодня является одним из основных инструментов для удержания и исследования биологических объектов, отдельных атомов и молекул. Несмотря на значительные достижения в области оптического манипулирования микро и нанообъектами, многие важные задачи остаются нерешенными. Так, одним из современных направлений оптомеханики является исследование влияния деформации на оптические свойства нанобъектов (см. публикации А.Н. Поддубного и А.В. Пошакинского по тематике резонансных структур с квантовыми ямами). Другая активно развивающееся область оптомеханики — использование вспомогательных микро и наноструктур, которые за счет локального изменения электромагнитного поля вблизи себя способны улучшить характеристики оптических ловушек или даже приводить к появлению новых эффектов. В течение последних нескольких лет над решением этой задачи работают сотрудники ФТИ им. А.Ф. Иоффе, совместно с университетом ИТМО и Тель-Авивским университетом.

Было теоретически исследовано распределение оптических сил, т.е. сил, обусловленных давлением излучения, внутри метаматериала, представляющего собой периодический массив металлических наностержней [1]. Показано, что за счет ближнепольного взаимодействия между стержнями может создаваться удерживающие потенциалы. Предсказано существование областей, где создается отрицательное световое давление, т.е. частица притягивается к источнику излучения, находящемуся внутри или вблизи метаматериала.

Проанализировано распределение оптических сил в сильно анизотропных одноосных материалах, одна из компонент тензора диэлектрических проницаемостей которых отрицательна [2]. Такие среды за счет характерной формы изочастотной поверхности в k-пространстве называют «гиперболическими». Гиперболические метаматериалы существенно изменяют структуру электромагнитного поля как в объеме, так и вблизи своих границ. Это дает возможности для создания новой высоко эффективной платформы для оптического управления движением микро и нанообъектов с помощью света. Предсказано появление отрицательного светового давления в гиперболическом метаматериале [2], которое приводит к притяжению наночастиц, расположенных внутри метаматериала

к источнику излучения, расположенному вне его границ. Более глубокий теоретический анализ оптических сил вблизи слоя метаматериала конечной толщины потребовал детального анализа спектра и модовой структуры с учетом эффектов пространственной дисперсии [3]. В частности, был проанализирован спектр собственных мод волновода, представляющего собой проводящий одноосный анизотропной метаматериал с нелокальным электромагнитным откликом, описываемым в рамках гидродинамической модели. Показано. что нелокальность электромагнитного отклика может приводить к подавлению отрицательной дисперсии, вызванной анизотропией. Было обнаружено, что совместное влияние пространственной дисперсии и анизотропии может приводить к компенсации потоков электромагнитной и механической энергии, что в свою очередь может приводить к обращению групповой скорости волноводных мод в нуль.

Интересные оптомеханические эффекты возникают под действием оптических сил на микро и



Рисунок 1 – Схематическое изображение сил, действующих на частицу, расположенную вблизи металлической подложки, в поле плоской р-поляризованной наклонно падающей волны. Сила отдачи возникает изза направленного возбуждения поверхностного плазмон-поляритона [4]. наночастицы, расположенные вблизи подложек, поддерживающих распространение поверхностных волн. Был рассмотрен простейший случай диэлектрической наночастицы на металлической (серебряной) подложке в поле плоской наклонно падающей линейно поляризованной волны [4](рис. 1). Предсказано существование «отрицательного» светового давления, действующего на частицы, расположенные вблизи поверхности металлов, причина которого — сила отдачи со стороны поверхностного плазмон-поляритона, возникающая вследствие его направленного возбуждения.

За счет взаимодействия с подложкой структура мод электромагнитного поля в удерживаемой частице сильно модифицируется по сравнению со случаем изолированного объекта. В минимальной модели это можно описать как взаимодействие частицы со своим «отражением» в металле. Однако, такое рассмотрение не учитывает эффекты запаздывания и перерассеяния электромагнитных волн. Теоретически и экспериментально было изучено влияние этих эффектов на модовую структур [5]. Был проанализирован простой, но крайне важный с практической точки зрения, случай захвата частицы, расположенной вблизи металлической подложки, в поле гауссова пучка [4, 5, 6]. Показано, что в такой системе возбуждение поверхностного плазмона на металлической подложке играет ключевую роль в формировании оптических сил, действующих на частицу. В зависимости от того, фокусируется ли падающий пучок выше или ниже границы раздела металл-диэлектрик, достигается увеличение или уменьшение жесткости ловушки по сравнению со стандартными стеклянными подложками.

- A. A. Bogdanov, A. S. Shalin, and P. Ginzburg, Optical forces in nanorod metamaterial, Sci. Rep. 5, 15846 (2015).
- A. S. Shalin, S. V. Sukhov, A. A. Bogdanov, P. A. Belov, and P. Ginzburg, Optical pulling forces in hyperbolic metamaterials, Phys. Rev. A 91, 63830 (2015).

- K. L. Koshelev and A. A. Bogdanov, Interplay between anisotropy and spatial dispersion in metamaterial waveguides, Phys. Rev. B 94, 115439 (2016).
- M. I. Petrov, S. V Sukhov, A. A. Bogdanov, A. S. Shalin, and A. Dogariu, Surface plasmon polariton assisted optical pulling force, Laser Photon. Rev. 10, 116 (2016).
- 5. I. Sinev, I. Iorsh, A. Bogdanov, D. Permyakov, F. Komissarenko, I.

Mukhin, A. Samusev, V. Valuckas, A. I. Kuznetsov, B.S. Luk'yanchuk, A.E. Miroshnichenko, Yu. S. Kivshar, Polarization control over electric and magnetic dipole resonances of dielectric nanoparticles on metallic films, Laser Photon. Rev. 10, 799 (2016).

 A. Ivinskaya, M. I. Petrov, A. A. Bogdanov, I. Shishkin, P. Ginzburg, and A. S. Shalin, Plasmon-assisted optical trapping and anti-trapping, Light Sci. Appl. 6, e16258 (2017).

ОПТИКА И ОПТОМЕХАНИКА РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Базовое подразделение – сектор Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле

Оптика полупроводниковых сверхрешеток является традиционной областью исследований в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, как фундаментальных, так и направленных на создание лазеров, светоизлучающих диодов и фотовольтаических элементов. В отдельное направление можно выделить эффекты, обусловленные взаимодействием света с экситонами в квантовых ямах. Еще в 1994 году в пионерской работе Е.Л. Ивченко с соавторами [1]было предсказано гигантское резонансное усиление отражения света в случае, когда период решетки равен половине длины волны света на частоте экситонного резонанса. Развитая в работе [1]теория брэгговских структур с квантовыми ямами заложила фундаментальные основы физики резонансных фотонных кристаллов и была многократно подтверждена в экспериментах, проводимых как в ФТИ, так и в других ведущих научных центрах. Теоретические исследования в этой области и сейчас активно идут в секторе Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле. Было описано формирование краевых



Рисунок 1 – (а) Распределение электрического поля, соответствующее краевым топологическим модам в полупроводниковой сверхрешетке со сложной элементарной ячейкой, содержащей барьеры различной толщины (показаны различными цветами). (б) Усиление и ослабление звука в сверхрешетке под действием лазерной накачки. (в) Соотношение коэффициентов пропускания звука через сверхрешетку вперед и назад в зависимости от волнового вектора звука и энергии лазера накачки.

топологических (наличие которых связано с топологическими свойствами объемных блоховских функций) оптических мод в спектральной области экситонного резонанса [2], рис. 1(а). Был предложен и экспериментально реализован резонансный брэгговский отражатель, перестраиваемый за счет модуляции частоты экситона электрическим полем [3]. Экспериментально и теоретически исследована оптическая активность вблизи экситонного резонанса в одиночных квантовых ямах [4] и предсказано усиление эффекта в киральных ван-дер-ваальсовых сверхрешетках на основе двумерных полупроводников, таких как монослои дихалькогенидов переходных металлов [5].

В последнее время особое внимание привлекают оптомеханические, т.е. связанные с когерентным взаимодействием света с колебательными модами кристалла, эффекты в полупроводниковых сверхрешетках. Отметим, что эффекты, обусловленные передачей импульса излучения наночастицам, приводящие к возникновению сил, действующих на нанообъекты, также активно исследуются в ФТИ (см. публикации А.А. Богданова). Оптомеханика переживает период стремительного развития, а результаты фундаментальных исследований уже активно используются в самых разных областях науки и техники. Среди устройств, основанных на оптомеханических эффектах, можно отметить детекторы гравитационных волн (исследования отмечены Нобелевской премией по физике 2017 года), оптические ловушки для удержания и охлаждения атомов и биологических молекул, оптические гироскопы. Однако до недавних пор полагалось, что влияние деформации на свойства оптомеханических компонентов связано лишь с изменением их геометрической формы, а изменение их диэлектрической проницаемости при деформации за счет эффекта фотоупругости упускалось из виду. В ходе совместных с экспериментаторами из института Нанонаук Парижа исследований было показано, что фотоупругий механизм взаимодействия является доминирующим в многослойных

структурах с квантовыми ямами GaAs/AlAs и открывает возможность реализации режима сильной связи между звуком и светом [6].

Построена теория резонансных оптомеханических эффектов в сверхрешетках с полупроводниковыми квантовыми ямами при наличии оптической накачки. Предложены конструкции оптически перестраиваемого акустического диода и акустического лазера [7,8] на основе таких структур, рис. 1(б) и (в). Установлено, что в случае сильного взаимодействия экситона со светом становится возможным преобразование звуковых колебаний в стоксово и антистоксово излучение, при этом возникают гибридные частицы, которые являются смесью фонона, фотона и экситона и аналогичны фоноритонам, теоретически рассмотренным в объемных полупроводниках А.Л. Ивановым и Л.В. Келдышем. В сверхрешетках фоноритонный эффект усиливается и приводит к акустической невзаимности, т.е. коэффициенты прохождения звука через структуру в противоположные стороны оказываются различными [7]. Сверхрешетка, состоящая из чередующихся узких и широких квантовых ям, может работать как перестраиваемый одномодовый акустический лазер [8].

- Е.Л. Ивченко, А.И. Несвижский, С. Йорда, Брэгговское отражение света от структур с квантовыми ямами, ФТТ 36, 1156 (1994).
- A.V. Poshakinskiy, AN. Poddubny, L. Pilozzi, and E.L. Ivchenko, Radiative Topological States in Resonant Photonic Crystals, Phys. Rev. Lett. 112, 107403 (2014).
- Y. Chen, N. Maharjan, Z. Liu, M.L. Nakarmi, V.V. Chaldyshev, E.V. Kundelev, A.N. Poddubny, A. P. Vasil'ev, M.A. Yagovkina and N.M. Shakya, Resonant optical properties of AlGaAs/ GaAs multiple-quantum-well based Bragg structure at the second quantum state, J.Appl. Phys. 121, 103101 (2017).
- L. V. Kotova, A. V. Platonov, V. N. Kats, V. P. Kochereshko, S. V. Sorokin, S. V. Ivanov, and L. E. Golub, Optical activity of quantum wells, Phys. Rev. B 94, 165309 (2016)
- 5. A.V. Poshakinskiy, D.R. Kazanov, T.V. Shubina, and

S.A. Tarasenko, Optical activity in chiral stacks of 2D semiconductors, Nanophotonics 7, 753 (2018).

- B. Jusserand, A.N. Poddubny, A.V. Poshakinskiy, A. Fainstein, A. Lemaitre, Polariton resonances for ultra-strong coupling cavity optomechanics in GaAs/AIAs multiple quantum wells, Phys. Rev.Lett. 117, 224302 (2016).
- A.V. Poshakinskiy and A.N. Poddubny, Phonoritonic crystals with synthetic magnetic field for acoustic diode, Phys. Rev. Lett. 118, 156801 (2017).
- A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, and A. Fainstein, Multiple Quantum Wells for PT-Symmetric Phononic Crystals, Phys. Rev. Lett. 117, 224302 (2016).

ТЕОРИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Базовое подразделение – сектор Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках

Кремний является основным материалом современной микроэлектроники. Доступность и дешевизна кремния, который по распространенности в земной коре занимает второе место после кислорода, возможность достижения высокой степени его очистки, уникальные и хорошо изученные свойства границы Si/SiO, обеспечили кремнию лидирующее положение в микроэлектронике и солнечной энергетике. Применение кремния в оптоэлектронике ограничено фундаментальной особенностью его зонной структуры — ее непрямозонностью: минимумы зоны проводимости находятся вблизи края зоны Бриллюэна (точки Х в k-пространстве), тогда как вершина валентной зоны в центре (в точке Г). Наиболее вероятные излучательные переходы в кремнии, как и в других непрямозонных полупроводниках, — переходы с поглощением или излучением фонона, который обеспечивает выполнение закона сохранения импульса. В силу слабости электрон-фононного взаимодействия излучательный переход с участием фонона требует дополнительного времени, и в объемном кремнии доминируют безызлучательные процессы.

Экспериментальное открытие излучения нанокристаллического и пористого кремния в видимом диапазоне в начале 90-х годов натолкнуло на мысль о возможном "выпрямлении" зонной структуры за счет наноструктурирования. В нанокристаллах размером в несколько нанометров электроны и дырки размерно квантованы и уже не обладают определенным квазиимпульсом вследствие соотношения неопределенности Гейзенберга. Это стимулировало бурное развитие технологии, экспериментальных и теоретических работ по изучению оптических явлений в кремниевых нанокристаллах. Учёными ФТИ им. А.Ф. Иоффе в сотрудничестве с коллегами из Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород) и Университета Амстердама выполнен цикл работ этой актуальной тематике [1]и [2].

Было проведено моделирование электронных состояний и вычислены вероятности оптических переходов в кремниевых нанокристаллах. Следует отметить, что в излучении из основного состояния кремниевых нанокристаллов доминирующую роль играют переходы. сопровождающиеся излучением оптического фонона, как и в объемном кремнии. Однако отсутствие возможности быстрого передвижения для электронов и дырок, локализованных в нанокристаллах, позволило разделить нанокристаллы на две группы: темные, в которых имеются центры безызлучательной рекомбинации, и светлые, которые и обеспечивают выход излучения. В результате были созданы эффективные оптоэлектронные устройства.

Большое интерес представляют такие открытые эффекты, как рождение электронно-дырочных пар в соседних нанокристаллах при поглощении одного фотона большой энергии (photon cutting) [3]и сдвиг





полосы фотолюминесценции "горячих" локализованных экситонов в красную сторону с уменьшением размера нанокристалла [4]. Это стимулировало детальное изучение плотности распределения электронов и дырок в к-пространстве на квантовых уровнях для широкого диапазона энергии и механизм их энергетической релаксации. Определяющую роль в скорости потери энергии играет излучение оптических фононов. Дискретность электронного спектра в нанокристаллах существенно замедляет этот процесс для электронов и дырок на нижних уровнях размерного квантования, где определяющим процессом энергетической релаксации становятся многофононные переходы. Энергетические щели между уровнями энергии для высоко возбужденных носителей заряда становятся меньше энергии оптических фононов, и здесь процессы релаксации с испусканием одного фонона уже возможны.

Однако скорость энергетической релаксации существенно понижается за счет процесса обратного перехода с поглощением испущенного фонона, выход которого из нанокристалла затруднен (phonon recycling). Была разработана теория энергетической релаксации в этих условиях для изолированного нанокристалла, покрытого водородом [5].

Метод сильной связи был развит для моделирования кремниевых нанокристаллов в матрице диоксида кремнния [6]. Именно такие нанокристаллы обычно являются объектом экспериментальных исследований и используются в большинстве реальных устройств оптоэлектроники и фотовольтаики. Распределение электронной плотности в **k**-пространстве для Si нанокристаллов в матрице SiO₂ с размерами: а) 1.3 нм, b) 2 нм, с) 3.5 нм представлено на рисунке 1 (на вставке показан спектр энергий для нанокристалла размером 1.3 нм).

Публикации

- О. Б. Гусев, А. Н. Поддубный, А. А. Прокофьев, И. Н. Яссиевич, Излучение кремниевых нанокристаллов (обзор), ФТП 47, 147 (2013).
- А. В. Герт, М. О. Нестоклон, А. А. Прокофьев, И. Н. Яссиевич. Моделирование методом сильной связи кремниевых и германиевых нанокристаллов (обзор), ФТП 51, 1325 (2017).
- D. Timmerman, I.Izeddin, P. Stallinga, I.N. Yassievich, T.Gregorkiewicz, Space-separated quantum cutting with silicon nanocrystals for photovoltaic applications, Nature Photonics 2, 105 (2008).
- W. D. A.M. de Boer, D. Timmerman, K. Dohnalova, I. N. Yassievich, H. Zhang, W. J. Buma, T. Gregorkiewicz. Red spectral shift and enhanced quantum efficiently in phonon-free photoluminescence from silicon nanocrystals, Nature Nanotechnology 5, 878 (2010).
- A.A. Prokofiev, A. N. Poddubny, I. N. Yassievich, Phonon decay in silicon nanocrystals: Fast phonon recycling, Phys. Rev. B 89, 125409 (2014).
- А. В. Белолипецкий, М. О. Нестоклон, И. Н. Яссиевич, Моделирование Si нанокристаллов в матрице SiO₂: подбор параметров эмпирического метода сильной связи, ФТП 52, (2018) (в печати).

ТЕОРИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С КВАНТОВО-РАЗМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Базовые подразделения – сектор Теоретических основ микроэлектроники, лаборатория Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей

Ввиду возможности прямой модуляции оптического излучения электрическим током накачки полупроводниковые лазеры широко используются в высокоскоростных оптических системах коммуникации.

В лазерах на квантовых точках стимулированные излучательные переходы происходят в наноразмерных областях, ограничивающих носители заряда во всех трёх пространственных измерениях. В Институте была построена теория динамических характеристик лазеров на квантовых точках [1, 2], учитывающая следующие факторы:

- (i) немгновенность захвата носителей заряда из слоя оптического ограничения в точки;
- (ii) внутренние потери оптического излучения, меняющиеся с изменением концентрации носителей заряда в слое оптического ограничения;
- (iii) наличие возбуждённых состояний носителей заряда в квантовых точках.

Показано, что существуют оптимальные значения тока инжекции и длины резонатора, при которых полоса частот модуляции излучения максимальна. Рассчитан верхний предел модуляционной полосы частот (рис. 1). Показано, что максимально возможная полоса прямо пропорциональна интегралу перекрытия электронной и дырочной волновых функций в квантовой точке, числу слоёв с квантовыми точками и поверхностной концентрации точек в слое, а также обратно пропорциональна неоднородному уширению линии излучения, вызванному разбросом параметров квантовых точек. Показано, что при 10% флуктуации размеров квантовых точек и 100% перекрытии волновых функций, верхний предел полосы модуляции лазера с одним слоем точек может достигать 60 ГГц (рис. 1).

Показано, что существуют критические значения параметров структуры, за которыми невозможна модуляция излучения в лазерах на квантовых точках — минимальное сечение захвата носителей заряда из слоя оптического ограничения в квантовые точки, максимальное сечение внутренних оптических потерь излучения в слое оптического ограничения и максимальное время релаксации носителей заряда с возбуждённого уровня на основной уровень размерного квантования в квантовой точке.



Рисунок 1 — Верхний предел модуляционной полосы лазера с одним слоем квантовых точек в зависимости от максимального модового коэффициента усиления и интеграла перекрытия электронной и дырочной волновых функций в квантовых точках.

Повышение выходной оптической мощности планарных полупроводниковых лазеров инфракрасного диапазона с наноразмерной активной областью все еще остается актуальной задачей, несмотря на достигнутые в этой области успехи. Имеется ряд факторов, которые могут ограничивать оптическую мощность диодных лазеров при высоких токах накачки.

Была разработана теория выходной мощности лазеров на квантовых ямах [3, 4], учитывающая следующие факторы:

- (i) немгновенность захвата носителей заряда из слоя оптического ограничения в яму;
- (ii) нарушение локальной зарядовой нейтральности в квантовой яме;
- (iii) внутренние потери оптического излучения, меняющиеся с изменением концентрации носителей заряда в слое оптического ограничения.

Показано, что немгновенность захвата в квантовую яму может привести к существенной сублинейности ватт-амперной характеристики лазера. Также предложен метод для определения скорости захвата носителей заряда из слоя оптического ограничения в квантовую яму и концентрации носителей в яме, основанный на измерении порогового тока и внутренней дифференциальной квантовой эффективности лазера. Как скорость захвата, так и концентрация носителей в квантовой яме, являются параметрами, трудно определяемыми иными методами.

Показано, что заряд носителей каждого знака в слое оптического ограничения значительно превышает заряд как электронов, так и дырок в квантовой яме. Таким образом, даже при имеющем место сильном нарушении локальной электронейтральности в яме, выполнение условия глобальной электронейтральности в лазерной структуре приводит к тому, что концентрации электронов и дырок в слое оптического ограничения практически одинаковы.

Показано, что внутренние оптические потери, меняющиеся с изменением концентрации носителей в слое оптического ограничения, могут привести к тому, что рабочие характеристики лазеров на квантовых ямах будут двузначными. В частности, могут существовать два порога генерации лазерного излучения и две ветви в ватт-амперной характеристики. В то время как внутренняя дифференциальная квантовая эффективность в первой («обычной») ветви характеристики меньше единицы и уменьшается с ростом тока накачки (сплошные кривые на рис. 2), внутренняя эффективность во второй («необычной») ветви ватт-амперной



Рисунок 2 – Внутренняя дифференциальная квантовая эффективность лазера на квантовой яме в зависимости от плотности тока инжекции для структур с толщинами слоя оптического ограничения 0.2, 0.5, и 0.8 µm. Сплошные и штриховые кривые — для первой («обычной») и второй («необычной») ветвей ватт-амперной характеристики соответственно.

характеристики больше единицы и является немонотонной функцией тока (штриховые кривые на рис. 2). Наличие второй ветви в ватт-амперной характеристики представляет интерес с точки зрения как фундаментальной лазерной физики, так и практических применений полупроводниковых лазеров с квантовыми ямами.

Публикации

 L.V. Asryan and R.A. Suris, Upper limit for the modulation bandwidth of a quantum dot laser, Appl. Phys. Lett. 96, 221112 (2010).

- L.V. Asryan, Y. Wu, and R.A. Suris, Carrier capture delay and modulation bandwidth in an edge-emitting quantum dot laser, Appl. Phys. Lett. 98, 131108 (2011).
- L.V. Asryan and Z.N. Sokolova, Optical power of semiconductor lasers with a low-dimensional active region, J. Appl. Phys. 115, 023107 (2014).
- Z.N. Sokolova, N.A. Pikhtin, and L.V. Asryan, Twovalued characteristics in semiconductor quantum well lasers, J. Lightw. Technol. 36, 2295–2300 (2018).

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СЛОИСТЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Базовое подразделение – сектор Теоретических основ микроэлектроники

Полупроводниковые лазеры являются традиционной областью исследования ФТИ им. А.Ф. Иоффе, и многие пионерские идеи сегодня уже перешли в стадию промышленного производства. Ярким примером является квантовый каскадный лазер, усиление электромагнитной волны в котором происходит за счет межподзонных переходов в полупроводниковой сверхрешетке, предложенный в [1]и впервые реализованный в в Bell Labs (США) [J. Faist et al., Science 264, 553 (1994)]. Несмотря на широкомасштабное использование этого принципа в современных оптоэлектронных устройствах, многие проблемы остаются актуальными. В частности, не решена задача создания мощных терагерцевых лазеров, работающих при комнатной температуре. Один из возможных путей ее решения — снижение поглощения на свободных носителях за счет оптимизация модовой структуры лазера, его геометрии и степени легирования инжекционных и обкладочных слоев.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе выполнен теоретический анализа структуры мод резонаторов квантовых каскадных лазеров [2,3]. В рамках единого подхода получена структура мод и спектр потерь электромагнитного излучения на свободных носителях. Показано, что важнейшую роль в формировании мод и спектра потерь играет присущая каскадным лазерам слоистая структура и, как ее следствие, — анизотропия спектра носителей заряда [4]. Продемонстрировано, что в ближнем ИК диапазоне наименьшие потери имеют обычные моды полого волновода, обладающие частотой отсечки, а среднем и дальнем ИК диапазонах поверхностные плазмон-поляритонные моды (рис. 1). В терагерцовой области наименьшие потери присущи ленгмюровским модам, представляющим собой плазменные колебания носителей заряда волноводного слоя, модифицированные его слоистой структурой.

- Р. Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводниках со сверхрешеткой, ФТП 5, 797 (1971).
- A.A. Bogdanov, R.A. Suris, Mode structure of a quantum cascade laser, Phys. Rev. B 83, 125316 (2011).



Рисунок 1 – Спектр потерь на свободных носителях тока собственных мод лазера. Мнимая часть волнового вектора приведена в обратной толщине волновода. Размерные значения длины волны (λ) и потерь (α) соответствуют волноводу толщиной 10 мкм.

 A. Bogdanov, R.A. Suris, Theoretical analysis of free carrier absorption in the cavity of a quantum cascade laser, Phys. Stat. Sol. (b) 249, 885 (2012). А. А. Богданов, Р.А. Сурис, Влияние анизотропии проводящего слоя на закон дисперсии электромагнитных волн в слоистых металлдиэлектрических структурах. Письма в ЖЭТФ 96, 52 (2012).

ТЕОРИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО И ИНТЕРФЕЙСНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В МУЛЬТИФЕРРОИДНЫХ И ФЕРРОМАГНИТНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Базовое подразделение – лаборатория Динамики материалов

В лаборатории Динамики материалов разработана феноменологическая теория магнитоэлектрических явлений в мультиферроидных гетероструктурах, содержащих ферромагнитные и сегнетоэлектрические материалы, и ферромагнитных наногетероструктурах с интерфейсной анизотропией, зависящей от приложенного электрического поля. В рамках данного исследования развита нелинейная теория магнитоэлектрических эффектов деформационной природы, обусловленных механическим взаимодействием между двумя компонентами гетероструктуры. При этом прямой магнитоэлектрический эффект, состоящий в изменении электрической поляризации при помещении гетероструктуры во внешнее магнитное поле, возникает в результате деформаций сегнетоэлектрического слоя, индуцированных магнитострикционными деформациями ферромагнитной компоненты. В свою очередь обратный магнитоэлектрический эффект в виде изменения намагниченности под действием электрического поля является следствием деформаций ферромагнитного слоя, порождаемых пьезоэлектрическими деформациями сегнетоэлектрика. В этой части исследования получены следующие основные результаты:

Предсказано существование гигантского обратного магнитоэлектрического эффекта в гетероструктурах, включающих ферромагнитные пленки, выращенные на сегнетоэлектрических подложках [1]. Показано, что данная аномалия возникает в результате спинового ориентационного перехода деформационного происхождения, происходящего в пленке при приложении электрического поля к сегнетоэлектрической подложке (рис. 1). Предсказанное явление экспериментально обнаружено в многослойной структуре Ni/Cu, выращенной на кристалле сегнетоэлектрика ВаТiO₃.

Предложена концепция магнитоэлектрической памяти случайного доступа, использующей только электрическое напряжение для записи и считывания информации [2]. Основным элементом такой памяти, выгодно отличающейся низким энергопотреблением, является магнитный туннельный контакт (переход) или многослойная структура с гигантским магнетосопротивлением на сегнетоэлектрической подложке.

– Выявлено сильное влияние деформаций решетки на магнитный резонанс в эпитаксиальных пленках кубических ферромагнетиков. Описаны условия, при которых обеспечивается эффективный электрический контроль резонансной частоты ферромагнитной пленки с помощью напряжения, прикладываемого к сегнетоэлектрической подложке. Этот результат демонстрирует перспективность гетероструктур «ферромагнетик-сегнетоэлектрик» для создания микроволновых приборов (фильтров, резонансных контуров, смесителей и т.д.) с низким энергопотреблением и высокой скоростью перестройки.

 Разработана нелинейная термодинамическая теория прямого магнитоэлектрического эффекта в гетероструктуре, состоящей из сегнетоэлектрической пленки, выращенной на ферромагнитной подложке, и многослойной структуре «сегнетоэлектрик-ферромагнетик».

- Теоретически описан магнитодиэлектрический

эффект деформационной природы в мультиферроидных гетероструктурах. Предсказана гигантская магнитоемкость сегнетоэлектрического конденсатора, изготовленного на ферромагнитной подложке.

– Показано, что критическая плотность спин-поляризованного тока, необходимая для 180° переключения намагниченности в магнитных туннельных контактах и многослойных структурах с гигантским магнетосопротивлением, существенно снижается вблизи спиновых ориентационных переходов, индуцированных деформациями кристаллической решетки или размерным эффектом [3]. Предложен метод повышения термической устойчивости магниторезистивной памяти, основанный на использовании сегнетоэлектрической подложки для временного приближения к ориентационному переходу в момент записи информации.

Также была развита теория магнитоэлектрических явлений, обусловленных изменением интерфейсной магнитной анизотропии нанослоя ферромагнетика, возникающим при приложении электрического поля к прилегающему к нему диэлектрику или сегнетоэлектрику. Здесь получены следующие основные результаты:

– Описано влияние электрочувствительной интерфейсной анизотропии на 180° переключение намагниченности, индуцированное спин-поляризованными токами в магнитных туннельных контактах [4]. Показано, что электрочувствительная анизотропия может как способствовать, так и препятствовать переключению намагниченности под действием тока. Найдены условия, при которых резко снижается критическая плотность тока, необходимая для переключения. Этот результат позволил объяснить легкое переключение намагниченности, экспериментально обнаруженное в контактах CoFeB/MgO/CoFeB с низкой электропроводностью.

 Теоретически описан динамический магнитоэлектрический эффект интерфейсной природы в виде прецессии намагниченности, возбуждаемой в



Рисунок 1 – Мультиферроидная гетероструктура в виде ферромагнитной пленки с намагниченностью М, выращенной на сегнетоэлектрической подложке, испытывающей пьезоэлектрические деформации в электрическом поле Е.

ферромагнитном нанослое высокочастотным электрическим напряжением, приложенным к прилегающей диэлектрической пленке. Расчеты частотных зависимостей комплексных магнитоэлектрических коэффициентов продемонстрировали возможность электрического управления резонансной частотой прецессии и достижения гигантских значений пиковых магнитоэлектрических восприимчивостей. Предложена концепция высокочувствительного датчика магнитных полей, использующая этот эффект в сочетании с магнетосопротивлением туннельных магнитных контактов.

 Предсказано существование спиновых ориентационных переходов, индуцированных переключением поляризации сегнетоэлектрической компоненты мультиферроидной гетероструктуры [5]. Показано, что возникающая переориентация намагниченности может приводить к существенному изменению электрического сопротивления мультиферроидного туннельного контакта. Это свойство позволяет использовать такие туннельные контакты в качестве элементов энергонезависимой памяти случайного доступа с электрической записью и считыванием информации.

- N. A. Pertsev. Giant magnetoelectric effect via straininduced spin-reorientation transitions in ferromagnetic films. — Phys. Rev. B 78, 212102 (2008).
- N. A. Pertsev, H. Kohlstedt. Magnetic tunnel junction on a ferroelectric substrate. — Appl. Phys. Lett. 95, 163503 (2009).
- N. A. Pertsev, H. Kohlstedt. Magnetoresistive memory with ultralow critical current for magnetization switching. — Advanced Functional Materials 22, 4696 (2012).
- N. A. Pertsev. Origin of easy magnetization switching in magnetic tunnel junctions with voltage-controlled interfacial anisotropy. — Scientific Reports 3, 2757 (2013).
- N. A. Pertsev, G. Viaud, B. Dkhil. Polarization-controlled spin reorientation transition and resistive switching in ferromagnetic-ferroelectric nanostructures and tunnel junctions. — Phys. Rev. B 90, 024426 (2014).

МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРЫЖКОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Базовое подразделение – сектор Физической кинетики и электроакустических явлений

В течение длительного времени в теории прыжковой проводимости считалось классическим приближение Хартри. В рамках этого приближения пренебрегают корреляциями чисел заполнения электронов на различных центрах. Это приближение позволило получить много важных результатов, например, закон Мотта для температурной зависимости прыжковой проводимости.

Можно показать, что без электрон-электронного взаимодействия в условиях термодинамического равновесия корреляции чисел заполнения действительно отсутствуют. Отталкивание между электронами приводит к появлению корреляций, которые были достаточно детально изучены, их учет, как показали А.Л. Эфрос и Б.И. Шкловский (1975 г), приводит к появлению кулоновской щели и качественно меняет температурную зависимость прыжковой проводимости. Вторая причина появления корреляций, отсутствие равновесия, почти не учитывалась в теоретических работах вплоть до последнего времени. Роль неравновесных корреляций в транспортных явлениях была исследована сотрудниками сектора физической кинетики в последние годы. В частности было показано, что магнетосопротивление во многих органических системах не может быть объяснено без учета этих корреляций.

Явление «органического магнетосопротивления» (в англоязычной литературе organic magnetoresistance или OMAR) было экспериментально открыто относительно недавно (в 2005 г., [Ö. Mermer, Phys. Rev. В **72**, 205202 (2005)]). В достаточно слабых магнитных полях (10-100 Гс) наблюдалось сильное (~10%) магнетосопротивление в ряде органических полупроводников. В различных материалах это магнетосопротивление отличалось по абсолютному значению и знаку, но



Рисунок 1 – Влияние внешнего магнитного поля на релаксацию относительного направления спинов двух электронов [1].

обладало характерной формой. Эту форму удалось связать с влиянием приложенного магнитного поля на релаксацию относительного направления двух спинов за счет сверхтонкого взаимодействия с ядрами (Р. А. Bobbert et. al., PRL 99, 216801 (2007)). В нулевом поле релаксация происходит за счет прецессии спинов вокруг локальных сверхтонких полей. Магнитное поле ~10-100 Гс приводит к тому, что спины начинают прецессировать вокруг общего направления, что заметно подавляет релаксацию (см. рис. 1). Тем не менее, классическая теория прыжковой проводимости не позволяет связать сопротивление системы со скоростью подобной релаксации.

Было показано, что классическая теория не способна описать органическое магнитосопротивление именно из-за приближения Хартри — это явление тесно связано с неравновесными корреляциями [1]. Продемонстрировано, что учет парных корреляций чисел заполнения даже в простейшей форме позволяет получать OMAR в рамках классической теории прыжкового транспорта. При этом неравновесные корреляции оказываются важны даже в режиме линейного отклика.

Полученные результаты указывают на важность дальнейшего исследования неравновесных корреляций в прыжковой проводимости, теория которых находится сегодня на начальной стадии развития.
Публикации

 A. V. Shumilin, V. V. Kabanov, V. I. Dediu, Magnetoresistance in organic semiconductors: Including pair correlations in the kinetic equations for hopping transport, Phys. Rev. B 97, 094201 (2018)

СВЕРХБЫСТРОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ФЕРРИМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Базовые подразделения – лаборатория физики ферроиков, сектор Физической кинетики и электроакустических явлений

В 2007 году в современной физике конденсированного состояния произошло важное событие, когда сотрудниками университетов Радбауд в Наймегене (Нидерланды) и Тибы (Япония) [Phys. Rev. Lett. 99, 047601 (2007)] было экспериментально показано, что одиночный фемтосекундный лазерный импульс может переключить намагниченность тонкой пленки ферримагнитного металла в отсутствии внешнего магнитного поля. Такое сверхбыстрое полностью оптическое переключение намагниченности позволяет превзойти



Экспериментальная демонстрация оптического переключения намагниченности в ферримагнетике GdFeCo: магнитооптические изображения, показывающие кинетику намагниченности и ее переключение в результате воздействия одиночного 40-фс лазерного импульса [1]. «Стоп-кадры» эволюции трех подсистем ферримагнитного металлического сплава: разные скорости размагничивания подрешеток A и B и передача энергии и углового момента за счет обменного рассеяния с s-электронами приводят к возникновению переходного ферромагнитоподобного состояния и последующему переключению намагниченностей A и B [4] скорость записи-считывания информации на магнитном носителе импульсом магнитного поля как минимум на порядок [1]. В последние несколько лет было проведено большое число экспериментальных исследований, в том числе и при участии сотрудников ФТИ им. А. Ф. Иоффе, направленных на выяснение особенностей отклика ферримагнитного металла на воздействие фемтосекундным лазерным импульсом [1-3]. Так, было показано, что оптическое переключение намагниченности не является прецессионным и происходит через ранее неизвестное сильнонеравновесное состояние, возникающее на временах порядка 1 пс [1], характеризуемое почти полностью разрушенной намагниченностью и ферромагнитоподобным упорядочением [I. Radu, et al, Nature (London) 472, 205 (2011)]. В связи с этими наблюдениями вопрос о том, каков микроскопический механизм оптического переключения намагниченности, стал предметом активных дебатов.

Учёными ФТИ была предложена теоретическая модель [4], которая позволяет описать сверхбыстрое оптическое переключение намагниченности как результат обменного рассеяния электронов в ферримагнетике, инициированного лазерно-индуцированным субпикосекундным увеличением температуры электронов проводимости. Наша модель учитывает основные особенности субпикосекундного отклика ферримагнитных металлов на фемтосекундное оптическое возбуждение, установленные ранее экспериментально. Для описания ферримагнитного металла введены две ферромагнитные подсистемы A (переходной металл) и B (редкоземельный металл). Антиферромагнитная связь между подсистемами A и B обеспечивается третьей подсистемой подвижных s(p)-электронов. Важно отметить, что такая модель справедлива и для ферримагнитного сплава и для композитного ферримагнетика, т.е. системы чередующихся нанослоев A и B.

Ключевой особенностью предложенной модели является то, что подвижные s-электроны обеспечивают как энергетический баланс в системе, так и баланс углового момента в ней. В частности, они ответственны за спиновую релаксацию, за взаимодействия с кристаллической решеткой, которая служит резервуаром углового момента. Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание ферромагнитных подсистем А и В происходит в результате субпикосекундого увеличения эффективной температуры s-электронов и их обменного рассеяния на соответствующих спиновых подсистемах, сопровождающегося переворотом спина. При этом предполагается, что электронный нагрев происходит за времена, много меньшие, чем времена спиновой кинетики (прежде всего, обменного рассеяния), тогда как далее электронная система постепенно охлаждается за счет передачи энергии от s-электронов решетке.

Ферромагнитная подсистема А, обладающая большей намагниченностью в равновесии, обладает при этом меньшим временем размагничивания, происходящего за счет передачи спина s-электронам, чем подсистема В. Так что в некоторый момент времени подсистема А полностью теряет намагниченность, тогда как подсистема В сохраняет в какой-то мере свою намагниченность, хотя ее размагничивание продолжается. В силу сохранения спина при обменном межэлектронном рассеянии s-электроны переносят спин от В к A, сообщая, подсистеме А направление намагниченности, противоположное исходному. В эксперименте этому соответствует неравновесное, с временем жизни ~1-2 пс, ферромагнитоподобное состояние. В ходе эволюции s-подсистема постепенно остывает за счет взаимодействия с кристаллической решеткой, и система А начинает восстанавливать свою намагниченность с направлением. заданным на предыдушем этапе подсистемой В. Подсистема В продолжает терять исходную намагниченность и далее начинает ее восстанавливать уже под влиянием обменного взаимодействия с подсистемой А. Таким образом, предложенная модель позволяет объяснить механизм переключения и его основные особенности. Поскольку кинетические процессы, входящие в предложенную модель, характеризуются малыми временами, переключение является быстрым, а возможность переключения зависит от тонкого баланса между временами обменного межэлектронного рассеяния и временами энергетической и спиновой релаксации, чем можно управлять, контролируя составы образцов.

Наиболее важный вывод из анализа модели состоит в том, что именно соотношения между временами релаксации и ферримагнитный характер системы являются определяющими факторами переключения намагниченности, тогда как роль механизма возбуждения (в упомянутых работах — оптического) сводится лишь к быстрому разогреву электронной системы. Такой нагрев может быть обеспечен, например, пропусканием электрического тока через ферримагнитную металлическую гетероструктуру. Это открывает крайне перспективную возможность сверхбыстрого управления намагниченностью электрическими импульсами. Недавно в работе [Y. Yang, et al, Science Adv. 3, e1603117 (2017)] действительно было продемонстрировано переключение ферримагнитной наноструктуры GdFeCo коротким импульсом тока в согласии с разработанной в ФТИ моделью.

Публикации

 K. Vahaplar, et al., Ultrafast Path for Optical Magnetization Reversal via a Strongly Nonequilibrium State, Phys. Rev. Lett. 103, 117201 (2009).

- K. Vahaplar, et al., All-optical magnetization reversal by circularly polarized laser pulses: Experiment and multiscale modeling, Phys. Rev. B 85, 104402 (2012).
- 3. T. A. Ostler, et al., Ultrafast heating as a sufficient stimulus for

magnetization reversal in a ferrimagnet, Nature Commun. 3, 666 (2012).

 A. M. Kalashnikova and V. I. Kozub, Exchange scattering as the driving force for ultrafast all-optical and bias-controlled reversal in ferrimagnetic metallic structures, Phys. Rev. B 93, 054424 (2016).

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ЯДЕРНЫХ СПИНОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В НАНОСИСТЕМАХ

Базовое подразделение – сектор Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле

Как правило, для исследования спиновой динамики носителей заряда в полупроводниках применяют методы, основанные на измерении отклика системы на внешнее воздействие: статическое или переменное магнитное поле. оптическое возбуждение. и т. п. Однако, изучение флуктуаций спиновой поляризации даже в равновесных условиях позволяет получить ключевые параметры спиновой динамики. Действительно, равновесные флуктуации наблюдаемых величин — в данном случае, спиновой поляризации электронов, дырок или электрон-дырочных комплексов, связаны флуктуационно-диссипационной теоремой с линейным откликом системы. Поэтому интенсивность и спектр спиновых флуктуаций несут в себе сведения о количестве спинов, частотах спиновой прецессии, временах дефазировки и релаксации спинов. На опыте спиновые флуктуации детектируются, например, по флуктуациям угла фарадеевского вращения плоскости поляризации света, проходящего через изучаемый образец (см. рис. 1(а)).

Задача о расчете спектра спиновых флуктуаций свободных носителей заряда в полупроводниках была сформулирована и решена Е.Л. Ивченко 45 лет назад [1] задолго до того, как были выполнены пионерские эксперименты по наблюдению спиновых флуктуаций в атомных газах (Е.Б. Александров и В.С. Запасский, ГОИ, 1981 г.) и полупроводниках (М. Oestreich и др., Ганновер, Германия, 2005 г.). Однако, именно развитие экспериментальных методик и переход от объемных материалов к низкоразмерным системам привели к острой необходимости разработки последовательной теории спиновых шумов в наносистемах. Особую значимость приобрели исследования флуктуаций спинов в структурах с квантовыми точками, где определяющую роль в спиновой динамике играет сверхтонкое взаимодействие.

В ФТИ была разработана теория спиновых флуктуаций локализованных носителей заряда с учетом сверхтонкого взаимодействия спинов электронов и ядер [2]. В рамках подхода, предложенного ранее Меркуловым, Эфросом и Розеном [Phys. Rev. B 65, 205309 (2002)] для описания электронной спиновой релаксации на ядрах, в котором ядерные спиновые флуктуации предполагаются статическими, были рассчитаны спектры флуктуаций спинов носителей заряда и ядер в квантовых точках. Показано, что спектр спиновых шумов содержит два пика (красная кривая на рис. 2б): один центрирован на нулевой частоте и отвечает за флуктуации компоненты спина электрона, параллельной ядерной спиновой флуктуации, а другой сдвинут в сторону высоких частот и обусловлен прецессией электронных спиновых флуктуаций в случайных ядерных полях. В последующих работах было учтено обменное взаимодействие электронов, локализованных на соседних центрах, для чего была разработана модель кластеров, а также прыжки между центрами [3]. Были получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать спектры спинового шума при



Рисунок 1 – (а) Схема детектирования спиновых флуктуаций δSz по флуктуациям поворота плоскости поляризации δθ. (б) Спектры спиновых флуктуаций электронов в ансамбле квантовых точек с учетом прыжков между точками. δ_e характеризует дисперсию частот электронной спиновой прецессии в ядерных полях,т_c^(e) время корреляции электрона в точке. На вставке показаны прыжки электрона: черная прямая стрелка — спин электрона, фиолетовые стрелки — ядерные поля. (в) Принципиальная схема измерения пространственных корреляций флуктуаций спиновой плотности в квантовой яме. (г) Корреляционная функция нормальной компоненты спина [4].

произвольном времени ожидания прыжка на центре, что позволило проследить переход между принципиально различными режимами спиновой динамики. Эта модель оказалась исключительно удобной для описания широкого круга экспериментальных данных. Было показано, что в спектре флуктуаций фарадеевского вращения должны присутствовать и ядерные спиновые шумы, что было впоследствии обнаружено в экспериментах.

Уже в первых экспериментах по спектроскопии спиновых шумов в электронном газе было установлено, что сильное влияние на динамику спиновых флуктуаций оказывает диффузия. Анализ показывает, что временные и пространственные корреляции спиновых флуктуаций свободных электронов связаны из-за броуновского движения и спин-орбитального взаимодействия [4]. На рис. 1(в) проиллюстрировано распространение спиновых флуктуаций в плоскости квантовой ямы. Эффективное магнитное поле, обусловленное спин-орбитальным взаимодействием, приводит к повороту электронного спина на угол, зависящий от траектории электрона. Корреляции спиновых флуктуаций могут быть как положительными, так и отрицательными (см. рис. 1(г)). Пространственные корреляции резко возрастают в режиме устойчивой спиновой спирали (в англоязычной литературе – persistent spin helix), когда угол поворота спина в эффективном поле определяется лишь его перемещением.

Особый интерес представляют спиновые флуктуации в неравновесных условиях. В [1]отмечалось, что генерационно-рекомбинационный шум и оптическая ориентация носителей заряда может существенно изменить спектр спиновых шумов в системе. Была развита теория неравновесных спиновых флуктуаций электронов, дырок и экситонов в условиях оптического возбуждения и при наличии динамической поляризации ядер основной решетки. Предложенный протокол спектроскопии спиновых флуктуаций с временным разрешением был реализован в ведущих экспериментальных лабораториях, исследующих спиновые шумы (в том числе в СПбГУ и в университете г. Монпелье, Франция). Основные результаты теоретических исследований спиновых флуктуаций в полупроводниковых наносистемах включены в монографию [5].

Публикации

- Е. Л. Ивченко, К вопросу о флуктуациях спиновой поляризации свободных носителей в полупроводниках, ФТП 7, 1489 (1973).
- M. M. Glazov, E. L. Ivchenko, Spin noise in quantum dot ensembles, Phys. Rev. B 86, 115308 (2012).
- Д. С. Смирнов, М. М. Глазов и Е. Л. Ивченко, Влияние обменного взаимодействия на спиновые флуктуации локализованных электронов, ФТТ 56, 254 (2014).
- A. V. Poshakinskiy and S. A. Tarasenko, Spatiotemporal spin fluctuations caused by spin-orbit-coupled brownian motion, Phys. Rev. B 92, 045308 (2015).
- M.M. Glazov, "Electron & Nuclear Spin Dynamics in Semiconductor Nanostructures," Series on Semiconductor Science and Technology, Oxford University Press Oxford, 2018.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ТОНКИЕ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Базовые подразделения — лаборатория Физики адсорбционно-десорбционных процессов, лаборатория Физики элементарных структур на поверхности

Процессы на поверхности конденсированных сред играют огромную роль в физической химии, материаловедении и физике конденсированных сред, т.к. именно через поверхность тела контактируют друг с другом и с окружающей средой. Именно свойства поверхности, зачастую свойства самого первого атомного или молекулярного слоя определяют процессы роста и разрушения кристаллов, процессы поглощения и излучения света и частиц, адсорбционные свойства и способность к катализу. Особую роль свойства поверхности приобретают при переходе к наноразмерным технологиям, т.к. при малых размерах частиц они начинают доминировать, превосходя по своей значимости свойства объема. Такие перспективные наноматериалы, как графен, являясь двумерным кристаллом, по сути представляют собой только поверхность, без объемной фазы. Физические представления, развитые для поверхности металлов и полупроводников, оказываются значимыми для биофизики и клеточной биологии, позволяя разделить вклад мембран и цитоплазмы в транспорт биологически активных атомов и молекул, а также в обеспечение термодинамической стабильности клетки.

Процессы на поверхности твердых тел во ФТИ начали изучать в 40-х — 50-х годах прошлого столетия, когда в работах Н.И. Ионова и Э.Я. Зандберг были сформулированы основные закономерности поверхностной термоионизации, и показаны огромные возможности, которые этот метод открыл в экспериментальной физике. В те же годы В.Н. Шредник создал первый в СССР ионный проектор, позволивший визуально наблюдать атомное строение материи с разрешением порядка 1 — 2 Å. В дальнейшем, с созданием техники сверхвысокого вакуума, эти исследования развивались широким фронтом, породив целый ряд замечательных научных результатов.

Одним из важнейших было открытие в 1972 году равновесного двумерного фазового перехода первого рода типа конденсации, порождавшего монослой графена на иридии (А.Я. Тонтегоде, Э.Я. Зандберг, Н.Д.





Потехина). Это открытие стало возможным только благодаря детальному пониманию эмиссионных и ионизационных процессов на поверхности. При T=1600-2000 К на поверхности металла в результате фазового перехода сосуществуют две фазы углерода: хемосорбированные атомы («двумерный углеродный газ») и островки графена. При этом поверхность становится неоднородной по работе выхода — см. Рис. 1.

На рис. 2 показана зависимость поверхностной концентрации этого двумерного углеродного хемосорбированного «газа» от температуры — аналог давления насыщенного пара в системе жидкость-пар. Определены основные энергетические параметры: энергия связи атома углерода с металлом, энергия связи краевого атома углерода с островком графена, энергия поверхностной миграции атомов углерода, энергия объемной диффузии [1, 2].

Для металлов, растворяющих в объеме углерод, в двумерный фазовый переход оказываются вовлечены ТРИ фазы: графен, хемосорбированные атомы углерода (двумерный углеродный газ) и атомы углерода, растворенные в объеме металла. Это, казалось бы, противоречит правилу фаз Гиббса. Однако на самом деле противоречия нет, т. к. кроме давления и температуры в процессе присутствует третий интенсивный термодинамический параметр: поверхностное натяжение.

Большой научный и практический интерес представляют особые хемосорбционные формы на поверхности металлов, ведущие себя подобно твердотельным химическим соединениям. Эти формы образуются при адсорбции многих неметаллов (С, О, Si, S, N, P) и некоторых металлов (Ni, Al, Be) на поверхности тугоплавких металлов (W, Mo, Ta, Nb, Re, Ir) образуя строго стехиометрические слои состава WC, WSi, MoSi, по отношению к атомам подложки на поверхности. При адсорбции в равновесных или локально равновесных условиях, образование таких слоев предшествует всем остальным физико-химическим процессам на поверхности: лишь после их образования становятся



Рисунок 2 – Зависимость концентрации хемосорбированного углеродного «газа» 0Р от температуры: : 1 — 0Р (T); 2 — In0Р = f(1/kT)

возможными, например, проникновение атомов углерода и кремния в объем и рост объемных карбидов, силицидов, или оксидов (Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтегоде, Н.Р. Галль). Эти структуры были названы поверхностными химическими соединениями: карбидами, силицидами и т.д. Их образование существенно меняет величины энергии активации в отношении транспортных процессов и твердофазных реакций, увеличивая скорость этих процессов на много порядков.

Поверхностные соединения вступают в химические реакции с атомами других веществ. Так напыление кремния на поверхностный карбид на W или Mo при достаточно высокой температуре приводит к вытеснению углерода с поверхности в растворенное состояние и замещение его кремнием (типичная реакция замещения). При термической десорбции кремния или его химическом уносе углерод выходит обратно и снова формирует поверхностный карбид. Наоборот, попадание на поверхностный силицид серы или кислорода приводит к образованию летучих молекул SiS или SiO, которые уносят кремний, и формированию поверхностного сульфида или оксида.



Рисунок 3 – Изменения Оже сигналов на (110)W при 1300 К: А) Si при его напылении, Б) Si и C при напылении Si на поверхностный карбид WC; Si и S при напылении S на поверхностный силицид WSi

Обнаруженные явления дают новую трактовку привычным кинетическим и термодинамическим константам, типа «упругость пара» или «предельная растворимость». Оказывается, что эти константы начинают зависеть от свойств поверхности задолго до достижения нанометровых размеров, что очень важно в физическом материаловедении [4].

Интерметаллические соединения золота со щелочными металлами (MeAu, где Me — Na, K, Cs, Rb) являются полупроводниками с широкой запрещенной зоной (например, у CsAuy Eg~ 2.7 эВ) и по своим свойствам близки к ионным полупроводникам. Освещение и приложение внешнего электрического поля вызывают изменение концентрации носителей заряда на поверхности MeAu, что позволяет за счет внешних воздействий управлять адсорбционно-десорбционными процессами и каталитическими процессами.

Большой научный и практический интерес представляет проблема формирования на поверхности твердого тела тонких пленок силицидов переходных металлов. Начальные стадии этих процессов на поверхности кремния были детально исследованы в лаборатории физики элементарных структур на поверхности (М.В. Гомоюнова, И.И. Пронин). Изучены термостимулированные твердофазные реакции в системах Fe/Si, Co/Si, Mn/Si и установлена взаимосвязь изменений фазового состава, атомного и электронного строения, а также магнитных свойств образующихся в этих системах сверхтонких пленок силицидов 3d металлов. Обнаружено, что при формировании сплава Co-Fe-Si происходит заметное увеличение магнитных моментов атомов железа, и, наоборот, снижение магнитных моментов атомов кобальта по сравнению с бинарными системами. Разработан новый способ синтеза сверхтонких пленок сплава Гейслера Co2FeSi на поверхности монокристаллического кремния, который может быть использован для создания инжекторов спин-поляризованных электронов в полупроводники. Изучено электронное строение сформированных пленок и продемонстрирована высокая степень поляризации электронов на уровне Ферми при комнатной температуре [5].



Рисунок 4 – Влияние освещения на термическую ионизацию диэтиламина (M-H)⁺(1) и Na (2) T=1000 K.

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование новых графеновых наносистем — ультратонких пленок силицидов магнитных металлов, покрытых графеном. Эксперименты проведены в условиях сверхвысокого вакуума in situ с привлечением широкого круга методов анализа поверхности (оже-спектроскопия, дифракция медленных электронов, сканирующая туннельная микроскопия, фотоэлектронная спектроскопия с использованием синхротронного излучения и магнитный линейный дихроизм в фотоэмиссии электронов). Графен был выращен на эпитаксиальных пленках никеля методом химического осаждения из газовой фазы. Синтез силицидов железа и кобальта осуществлен оригинальным способом, основанным на последовательной интеркаляции графена атомами металлов (Fe, Co) и кремния [6]. Эти эксперименты дали уникальную информацию об эволюции атомной структуры, электронного строения и магнитных свойств пленок на всех стадиях синтеза.

Найдены оптимальные условия формирования ультратонких магнитных пленок силицидов железа и кобальта, защищенных графеном от воздействия окружающей среды, установлено влияние пространственной ограниченности сверхтонких слоев ферромагнетиков, локализованных под графеном, на особенности протекания в них структурных и магнитных фазовых переходов. Продемонстрирована возможность формирования под графеном псевдоморфных пленок Fe(111) с ГЦК структурой толщиной до 14 монослоев. Обнаружен размерный эффект переориентации спина, приводящий к появлению ферромагнитного упорядочения пленки вдоль поверхности. Показано, что пороговая толщина (5 монослоев Fe, см. Рис. 5), при которой наступает этот переход, существенно превышает аналогичную величину для свободной пленки железа с ОЦК структурой. Установлено, что последующая интеркаляция данной системы кремнием приводит к формированию под графеном упорядоченной пленки твердого раствора кремния в железе, покрытой согласованным с подложкой поверхностным силицидом Fe₃Si со структурой (√3х√3)R30°. Обе эти фазы обладают ферромагнитным упорядочением с ориентацией спинов вдоль поверхности образца. Наконец, обнаружено, что формирование под графеном поверхностного силицида железа резко ослабляет взаимодействие графена с подложкой и восстанавливает его уникальные электронные свойства (Рис. 5) [6]. Полученные результаты имеют фундаментальную значимость для физики и химии поверхности, материаловедения, магнетизма низкоразменых систем и спинтроники.

Изучены процессы, лежащие в основе синтеза тонкопленочных эпитаксиальных структур оксид-полупроводник с кристаллическими, атомно-резкими интерфейсами; исследованы механизмы формирования и физико-химические свойства таких интерфейсов. Показана возможность модификации электронных свойств



Рисунок 5 – Схема интеркаляционного синтеза силицидов железа под слоем графена и модификация электронной структуры графена и магнитных свойств интеркалированных пленок в ходе этого процесса.

нанопленок редкоземельных металлов на кремнии под воздействием различных адсорбатов [7,8]

Изучены эмиссионные свойства разнообразных эмиттеров из сплавов и соединений сложного состава в сильных электрических полях. Разработаны высокоэффективные точечные источники электронов и ионов для целей нанотехнологии. Обнаружено отличие роста графена при каталитическом разложении углеводородов на искривлённой поверхности в сильном поле от явлений, происходящих на плоской поверхности. Обнаружен ряд неожиданных эффектов: аномально сильное понижение работы выхода при одновременном наличии атомов щелочного металла на пленке графена и в интеркалированном состоянии под пленкой; интенсивная поверхностная диффузия цезия в электрическом поле по покрытой углеродом и цезием поверхности рения при отсутствии диффузии по свободной от цезия поверхности; эмиссия ионов в результате полевой десорбции атомов щелочного металла, интеркалированных графитом или графеном.

Публикации

- E. V.Ruťkov, N. R.Gall, Equilibrium Nucleation, Growth, and Thermal Stability of Graphene on Solids; Physics and Applications of Graphene — Experiments, Sergey Mikhailov (Ed.), ISBN: 978-953-307-217-3, InTech, (2011). pp. 209-292;
- Галль Н. Р., Рутьков Е.В., Графен и графит на металлах; СПб, изд Политехнического Университета, 2013
- E. V. Rut'kov, N. R. Gall, Solubility Limit of Carbon in Rh Measured by Graphene Growth on the Surface. Applied Surface Science V. 300 (2014), pp. 1087-1092
- G. S. Grebenyuk, M. V. Gomoyunova, I. I. Pronin et al. Formation and investigation of ultrathin layers of Co2FeSi ferromagnetic alloy synthesized on silicon covered with a CaF2 barrier layer. Applied Surface Science 365 (2016) 88–92
- G. S. Grebenyuk et al. Intercalation synthesis of graphene-capped iron silicide atop Ni(111): evolution of electronic structure and ferromagnetic ordering. Applied Surface Science, 392 (2017) 715–722
- M. Kuzmin et al. Origin of Fermi-level pinning and its control on the n-type Ge(100) surface. Phys. Rev. B 94, 035421 (2016).
- M. Kuzmin et al. Observation of unusual metal-semiconductor interaction and metal-induced gap states at an oxidesemiconductor interface: The case of epitaxial BaO/Ge(100) junction. Phys. Rev. B 92, 165311 (2015). 3.4.2

ВЫРАЩИВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ Для использования в оптоэлектронной технике

Базовое структурное подразделение — лаборатория Электроники полупроводников с большой энергией связи, при участии лаборатории Микроволновой спектроскопии кристаллов

Описаны результаты по выращиванию объемных кристаллов SiC и AIN методом сублимации. Получены кристаллы, высокого структурного совершенства, с низким содержанием фоновых примесей, диаметром от 2х до 4х дюймов, на базе которых разрабатываются оптоэлектронные приборы, такие как источники одиночных фотонов, ультрафиолетовые светодиоды, источники и фотоприемники терагерцового излучения (в диапазоне частот 0.1-10 ТГц), перспективные, в частности, для использования в медицине и биологии.

Карбид кремния (SiC) и нитрид алюминия (AIN) являются широкозонными материалами с большой энергией связи. Эти материалы, в первую очередь SiC, используются в качестве подложек для создания светодиодов с излучением видимом диапазоне света, а также для изготовления мощных силовых диодов, способных работать в сложных условиях — при повышенных температурах, при воздействии проникающей радиации, электрических и магнитных полей. В то же время, AIN является превосходной подложкой для получения GaN-based оптоэлектронных приборов. На его основе также могут быть изготовлены ультрафиолетовые светодиоды для очистки и дезинфикации воды, потребность в которых очень велика.

В последнее время появились новые возможности применения этих материалов в оптоэлектронике, в частности, для создания квантовых усилителей (мазеров). Большой интерес представляют источники одиночных фотонов на вакансиях кремния в SiC, функционирующие при комнатной температуре в ИК-диапазоне [1]. Для получения подобных приборов требуется решение целого ряда технологических задач, связанных с получением объемных кристаллов высокого структурного совершенства. Необходимо выращивать кристаллы с низким уровнем фоновых примесей, иметь возможность управлять изотопным составом кристалла, получать требуемый политип. Для производства приборов желательно получать кристаллы крупных размеров, на подложках из которых можно наращивать эпитаксиальные структуры в современных реакторах.

Рост кристаллов широкозонных полупроводников — SiC, AIN осуществлялся путем сублимации переносом через паровую фазу (PVT). Для повышения эффективности массопереноса и уменьшения потерь паров источника зазор между источником и затравкой был не более 0,2 от размеров источника, тем самым реализовывался "сублимационный сэндвич-метод", разработанный ранее Ю.А. Водаковым и Е.Н. Моховым во ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Использование специальных контейнеров из карбидизированного тантала (вместо графита), позволяло повысить чистоту выращиваемых кристаллов и резко уменьшить потери дорогостоящих исходных материалов. Разработанная методика позволяла получать кристаллы различных политипов SiC, в том числе 4H [2], 6H и 15R [3],

Выращивание кристаллов SiC и AIN проводилось в печах сопротивления (рис. 1). Поликристаллические источники SiC синтезировались из полупроводникового кремния и спектрально чистого углерода. В процессе роста ростовая камера продувалась инертным газом, содержащим водород.

Внешний вид установки сублимационного роста кристаллов SiC и AIN диаметром до 6 дюймов (150 мм) приведен на рис. 1. Установка оборудована



Рисунок 1 – Установка выращивания кристаллов SiC диаметром до 6".

современной вакуумной системой с турбомолекулярным насосом, автоматизированной системой контроля и управления процессом выращивания кристаллов. Так же данная установка оборудована системой раздельной подачи основного газа и дополнительного газа непосредственно в объем ростовой ячейки. Здесь же представлены выращенные на ней кристаллы SiC, политипа 6H, диаметром 100 мм. После выращивания кристалла карбида кремния, проводится механическая обработка и резка на пластины. Выращиваемые кристаллы SiC были бесцветными (рис. 2), что свидетельствовало о их высокой чистоте. Удельное сопротивление чистых кристаллов было более 10⁵ Ом см.

Измерения концентрации примесей проводили методом ВИМС, В нелегированных образцах концентрация бора и азота находится на уровне 10¹⁶ см⁻³, а AI — 10¹⁵ см⁻³.

Выращивание кристаллов карбида кремния с измененным изотопным составом проводилось с использованием изотопа 28Si. Использовался предварительно подготовленный кремний, с изотопным составом 99,999% 28Si, в виде мелких кусочков (1 — 3 мм). Данный изотоп кремния является стабильным. Процесс синтеза источника для выращивания кристаллов карбида кремния с измененным изотопным составом происходил аналогичным образом, как и для источника с природным содержанием изотопов. До синтеза тигель и внутренняя арматура печи обезгаживается при температуре 2200°С и вакууме 10⁻⁵ торр в течение 3 часов в установке резистивного нагрева, после



Рисунок 2 – Фотография пластины SiC, политипа 6H, легированного примесью азота (а) и чистого от примесей (б). Диаметр пластин – 100 мм. Видно, что нелегированная пластина практически не имет окраски. Фотография кристалла AIN, диаметром 50 мм, выращенного на SiC затравке (в)

чего тигель загружается смесью порошков углерода и кремния (²⁸Si) в стехиометрическом соотношении. Проводится процесс изготовления порошка карбида кремния. В качестве затравочного кристалла использовали пластину карбида кремния ориентации (0001) диаметром около 15 мм политипа 6Н. После выращивания кристалла карбида кремния 28SiC, проводили механическую обработку и резку кристалла на пластины. Измерения концентрации примесей и изотопного состава проводили методом ВИМС. Результаты измерений концентрации основных примесей представлены на рис. 2. Из полученных данных видно, что содержание изотопа ²⁸Si находится на уровне 99,799%, в то время как природное содержание данного изотопа составляет около 92.255%. Так же необходимо отметить низкую концентрацию алюминия 1,6·10¹⁴ см⁻³ в выращенном кристалле. Столь низкую концентрацию можно объяснить высококачественной очисткой данного изотопного кремния на стадии газо-центрифужного разделения.

Исследуя изотопно-обогащенные кристаллы SiC удалось установить тонкую структуру центра вакансии кремния [2].



Рисунок 3 – Концентрации примесей в кристалле SiC, обогащенном изотопом ²⁸Si, определенная методом ВИМС. Измерение плотности микропор и дислокаций в выращенных кристаллах проводилось оптическим методом, по результатам фотостимулированного травления в щелочи. Показано, что средняя плотность микропор SiC не превышает 3 см⁻², а плотность дислокаций варьируется от 10³ см⁻² до 10⁴ см⁻². В кристаллах AIN плотность дислокаций на порядок выше.

Существенное понижение плотности дислокаций достигалось при латеральном разращивании затравки кристалла [4] или при использовании специальных затравок с профилированной поверхностью [5]. Проведенные измерения качества таких кристаллов показали, что концентрация торчковых дислокаций в них снижается более, чем на 2 порядка. Используемые методы являются перспективными для получения малодислокационных кристаллов SiC и других полупроводниковых материалов.

В случае роста кристаллов AIN, существенное улучшение качества кристаллов достигалось, когда в процессе роста происходило удаление затравки путем сублимационного испарения затравки SiC [6].

Публикации

- V.A. Soltamov, B.V. Yavkin, O. Tolmachev, R.A. Babunts, A.G. Badalyan, V.Yu. Davydov, E. N. Mokhov, I.I. Proskuryakov, S.B. Orlinskii, P. G. Baranov, Optically addressable silicon vacancy-related spin centers in rhombic silicon carbide with high breakdown characteristics and E. D. R evidence of their structure. Phys. Rev. Lett. 115, 247602 (2015).
- D. Simin, V. A. Soltamov, A. V. Poshakinskiy, A. N. Anisimov, R. A. Babunts, D. O. Tolmachev, E. N. Mokhov, M. Trupke, S. A. Tarasenko, A. Sperlich, P. G. Baranov, V. Dyakonov, G. V. Astakhov. All-optical dc nanotesla magnetometry using silicon vacancy fine structure in isotopically purified silicon carbide. 2016, Phys. Rev. X 6, 031014 (2016)
- V.A. Soltamov, B.V. Yavkin, O. Tolmachev, R.A. Babunts, A.G. Badalyan, V.Yu. Davydov, E. N. Mokhov, I.I. Proskuryakov, S. B. Orlinskii, P. G. Baranov, Optically addressable silicon vacancy-related spin centers in rhombic silicon carbide with high breakdown characteristics and E. D. R evidence of their structure. Phys. Rev. Lett. 115, 247602 (2015).

- T. S. Argunova, M. Yu. Gutkin, J. H. Je, J. H. Lim, E. N. Mokhov, A. D. Roenkov Structural transformation of lattice defects in freespreading growth of bulk SiC crystals. CrystEngComm, Advance Article. V.16, P.8917–8923, (2014). DOI: 10.1039/c4ce01515k
- 5. E. N. Mokhov, S. S. Nagalyuk, V. A. Soltamov, "Structural Perfection

of Silicon Carbide Crystals Grown on Profiled Seeds by Sublimation Method", Materials Science Forum, Vols. 821-823, pp. 359-362 (2015).

 E. N. Mokhov, T. S. Argunova, J. H. Je, O. P. Kazarova a and K. D. Shcherbachev Freestanding single crystal AlN layers grown using the SiC substrate evaporation method. CrystEngComm, 2017, 19, 3192

ПРОФИЛИРОВАННЫЕ КРИСТАЛЛЫ: УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ, СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ

Базовое подразделение — лаборатория Физики профилированных кристаллов

Данное направление развивается в лаб. Физики профилированных кристаллов с момента, когда ее первый заведующий А.В. Степанов начал систематические исследования по технологии роста кристаллов (50-60-е годы ХХ века) [1,2]. В основе этих работ лежал предложенный им еще в 1938 г. принципиально новый способ кристаллизации материалов, в котором появилась возможность контролировать форму и размеры выращиваемого кристалла. Как впоследствии оказалось, идеи А.В. Степанова о формообразовании кристаллов привели к развитию множества новых технологий получения кристаллических материалов и изделий из них. В современной науке и технике способ Степанова упоминается наряду с хорошо известными методами роста кристаллов из расплава: Чохральского, Киропулоса, Бриджмена-Стокбаргера. Вместе с тем, в настоящий момент ясно, что этот метод не сводится к конкретному варианту кристаллизации, он значительно шире. Фактически все ростовые технологии с использованием интерфейсного устройства между расплавом и кристаллом можно назвать способом Степанова. В коммерческом плане наиболее известен вариант способа Степанова, называемый в англоязычной литературе EFG (edge-defined film fed growth), который первоначально был применен для производства изделий из сапфира и далее использовался для роста ряда высокотемпературных оксидных материалов. В настоящее время более 15 % сапфировых кристаллов и изделий из них производятся по этой технологии. Метод позволяет получать изделия из сапфира практически любой сложности, некоторые формы (профили) могут быть получены только данным способом, например, длинные трубки с множественными отверстиями для различного типа термопар. Есть случаи, когда данная технология получения для отдельных типов кристаллов является основной, так, подложечные пластины нового широкозонного полупроводника β-Ga₂O₃ производятся только данным методом.

Лаборатория физики профилированных кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе сохраняет традиции, заложенные ее основателем, и продолжает поиск новых решений в вопросах получения высококачественных кристаллов различного назначения. В поле зрения исследований лаборатории находятся как конструкционные поликристаллические материалы, так и функциональные монокристаллы.

В настоящий момент поисковые исследования по технологии кристаллизации изделий заданной формы сконцентрированы на следующих основных материалах:

- кристаллы сапфира (α-Al₂O₃) и изделия из них;
- новые оксидные полупроводники (β-Ga₂O₃);
- кристаллы с эффектом памяти формы
 с классическим термоупругим превращением на основе сплавов Cu-Al-Ni;
- кристаллы с магнитным эффектом памяти формы



Рисунок 1. Шайба, вырезанная из сапфировой трубки, выращенной вдоль базисной оси [0001], для анализа напряженного состояния и формирующейся блочной структуры. Вид образца: а) оптическое изображение в неполяризованном свете, б) в поляризованном свете, в) рентгеновская топография.

системы Ni-Fe-Ga-(Co) с взрывным характером восстановления деформации памяти формы;

- кристаллы кремния для солнечной энергетики;
- поликристаллические сплавы на основе алюминия.

Если первоначально способ Степанова в большей степени рассматривался как экономичный вариант изготовления изделия заданной формы, то в дальнейшем акцент был сделан и на обеспечение необходимого уровня свойств, которые достигаются управлением кристаллической структурой материалов. В случае монокристаллов речь идет о снижении в технологических процессах термоупругих напряжений и недопустимости развития блочной структуры, резко ухудшающей как оптические, так и механические свойства. Эти исследования проводились совместно с лабораторией Прикладной математики и математической физики. Данному вопросу посвящен цикл пионерских работ, выполненных сотрудниками лаборатории на сапфире с использование поляризационно-оптической микроскопии и метода рентгеновской топографии [3].

На рис. 1а представлена шайба, полученная в результате поперечного разреза сапфировой трубки. В поляризованном свете при скрещенных николях в ней видны блоки (рис. 1б), расположенные по внешней поверхности трубки и вытянутые в радиальном направлении. Вблизи внутреннего отверстия трубки блоков нет. Рентгеновская топограмма (рис. 1в) дает картину, подобную оптической. Показано, что отклонение блоков от оси роста трубки составляет 5-15 угловых минут, а взаимный разворот блоков вокруг направления 000[1] укладывается в 1,5 градуса.

В лаборатории был предложен и разработан новый вариант способа Степанова — формообразование из элемента формы, позволяющий получать кристаллы сложного профиля. Этот вариант способа был использован для изготовления сферических сапфировых обтекателей ракет. С использованием пластин из профилированного сапфира также была впервые предложена и разработана, совместно с лабораторией Динамики материалов, прозрачная высокопрочная броня. Выполненные в лаборатории работы по управлению формой и структурой профилированных кристаллов в целом представляют интерес для производства пластин и трубок различного назначения. Пример использования сапфировой трубки в газоразрядной лампе



Рисунок 2. Газоразрядная лампа, изготовленная из сапфировой трубки.



Рисунок 3. Структурно совершенные (без блоков) сапфировые ленты базисной (0001) ориентации.



Рисунок 4. Высококачественые кристаллы сплава Cu-Al-Ni, получены вытягиванием из расплава по способу Степанова с высокой точностью заданных размеров. показан на рис. 2. Важность отсутствия блочности в кристаллах особенно проявляется при применении кристаллов в качестве полупроводниковых подложек и элементов прецизионных оптических устройств. Задача получения безблочных сапфировых лент с базисной ориентацией успешно решена в лаборатории в числе первых в мире. На рис. 3 представлены ленточные кристаллы сапфира с атомарно гладкими гранями, на которых даже без дополнительной обработки их поверхности могут быть получены яркие светодиодные структуры.

Интеллектуальные кристаллы (smart materials) с эффектом памяти формы (ЭПФ) — одно из главных направлений исследований, проводимых в лаборатории. Полученные в лаборатории кристаллы сплавов на основе меди с ЭПФ считаются одними из лучших в мире, и большинство отечественных и зарубежных работ выполнено именно на кристаллах этого типа. Кристаллы, выращенные в форме цилиндрических стержней, имеют потрясающую для ростовых технологий точность выдержки заданных размеров, сравнимую с тем, что достигается металлорежущим оборудованием (рис. 4). Заметим, что данные кристаллы в целом плохо поддаются классическим методам механических обработок. Скорость такой обработки безнадежно проигрывает технологическому процессу группового роста кристаллов. Главным преимуществом монокристаллов с эффектом памяти формы является отсутствие в них в широком интервале деформаций и температур необратимых деформаций, что свойственно их главному конкуренту — поликристаллическому никелиду титана (TiNi). Стопроцентный возврат деформации позволил разработать на их основе принципиально новые управляемые силовые приводы и двигатели, которые в классе компактных мощных силовых устройств являются безусловными лидерами. Пример конструкции робота с двумя кристаллами с ЭПФ представлен на рис. 5. Данная конструкция является результатом совместной работы научных сотрудников лаборатории и



Рисунок 5. Макет робота-манипулятора с поступательным и вращательным силовыми двигателями, изготовленный на кристаллах сплава Cu-Al-Ni.

инженеров ЦНИИ робототехники и технической кибернетики (Санкт-Петербург) [4].

В лаборатории разрабатывается технология роста новых кристаллов с магнитным эффектом памяти формы на основе сплавов Гейслера. Обнаружен и исследован обнаруженный в них эффект взрывного восстановления памяти формы, который может приводить к скачкообразному перемещению всего образца с высокой скоростью, большей 20 м/с. В настоящее время исследуется возможность управления параметрами скачкообразного движения образца для разработки



Рисунок 6. Монокристалл сплава Ni-Fe-Ga с магнитным эффектом памяти формы, выращенный по способу Степанова.

новых быстродействующих силовых приводов [5]. Большое внимание уделяется не только монокристаллам, но и классическим поликристаллическим сплавам, которые также успешно получают в лаборатории способом Степанова. В случае поликристаллических сплавов механические свойства во многом определяются размером зёренной структуры. Показано, что существенного улучшения конструкционных свойств силуминов в ходе выращивания профилей можно достичь, если в процессе вытягивания изделия ввести в расплав малые добавки, например 0,01 вес.% Sr, и увеличить скорость вытягивания кристалла из расплава. Это инициирует снижение размера зерна, вплоть до субмикроскопических, и приводит к увеличению прочности и пластичности материала [6].

Идея достижения ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структур является весьма популярной в современном материаловедении, используются не только чисто ростовые способы, но и, главным образом, методы интенсивной пластической деформации (ИПД) материала в твердом состоянии. С 2013 года проводятся работы по исследованию влияния УМЗ структуры алюминиевых сплавов, полученных методами ИПД, на их механические и электротранспортные свойства [7]. Эти исследования направлены на управляемое создание структуры материала с целью увеличения его прочности при сохранении высокого уровня электропроводности. В лаборатории впервые экспериментально показано, что путем низкотемпературного кратковременного отжига УМЗ АІ и сплавов системы Al-Zr можно повысить их предел текучести на 50% и прочность на 30%, при этом электропроводность даже слегка возрастает. Предложен режим комбинации отжиг — небольшая дополнительная деформация для УМЗ AI, приводящий к рекордной пластичности при сохранении высокой прочности. Показана определяющая роль релаксации неравновесных границ зёрен в эффекте упрочнения отжигом, разработана физическая модель микромеханизмов пластической дефор-



Рисунок 7. Профили алюминиевых сплавов, полученные из расплава методом Степанова.

мации, обеспечивающей упрочнение отжигом и реализацию высокой пластичности после дополнительной деформации — явлений, характерных только для УМЗ и НК состояний. Установлено, что при заданных кристаллографических параметрах границ зёрен их удельное сопротивление сильно зависит от их состояния "равновесное — неравновесное".

Можно отметить большой цикл работ по исследованию механических свойств УМЗ материалов при гелиевых температурах, проведенных лаборатории. Исследование дислокационной динамической диффузии молекул окружающей среды в них выполнено [8] с использованием уникальной масс-спектрометрической методики, развиваемой в лаборатории [9]qдля широкого круга задач механодеструкции. Активно используются для исследования ультразвуковая методика внутреннего трения в кристаллах и сплавах, и метод акустоэмиссии для контроля локальных искажений структуры при деформациях, также разработанные в лаборатории.

Публикации

- Степанов А. В. Способ изготовления полуфабрикатов из полупроводниковых материалов путем непосредственного вытягивания или выпрессовывания из расплава. Авт. свид. №112624 // Бюл. изобрет. 1958. N.5. С.89
- Степанов А. В. Новый способ получения изделий (листа, труб, прутков, разного профиля и т.п.) непосредственно из расплава-1 // ЖТФ. 1959. Т.29. N.3. С.381-393.
- Krymov V. M., Nosov Yu.G., Bakholdin S. I., Maslov V. N., Shul'pina I. L., Nikolaev V. I. Blocks and residual stresses in shaped sapphire single crystals // J. Cryst. Growth. 2017. V.457. P.314-319.
- Priadko A. I., Nikolaev V. I., Pulnev S. A., Stepanov S. I., Rogov A. V., Chikiryaka A. V., Shmakov O.A. Shape memory Cu–Al–Ni single crystals for application in rotary actuators // Materials Physics and Mechanics. 2017. V.32. N.1. P.83-87.
- Nikolaev V. I., Malygin G. A., Averkin A. I. Anomalous stress-strain behaviour in Ni49Fe18Ga27Co6 crystals compressed along 110. // Mater. Today Proc. 2017. V.4. N.3(B). P.4807-4813.
- Аверкин А. И., Корчунов Б. Н., Никаноров С. П., Осипов
 В. Н. Влияние стронция на механические свойства сплава алюминия с кремнием // Письма ЖТФ. 2016. Т.42. N.4. С.67-73.
- Mavlyutov A. M., Bondarenko A. S., Murashkin M. Y., Boltynjuk E. V., Valiev R. Z., Orlova T. S. Effect of annealing on microhardness and electrical resistivity of nanostructured SPD aluminium // J. Alloy. Compd. 2017. V.698, P.539-546.
- Клявин О. В., Аруев Н. Н., Деркаченко Л. В., Федоров В. Ю., Чернов Ю. М., Шпейзман В. В. Влияние газовой среды в процессе прокатки на микротвердость алюминия и железа // ФТТ. 2016. Т.58. N.4. С.692-695.
- Клявин О. В., Аруев Н. Н., Болтенков Б. С., Поздняков А. О., Чернов Ю. М., Шпейзман В. В. Использование среды гелия для получения наноразмерных порошковых материалов на примере промышленного цемента // ФТТ. 2014. Т.56. N.2. С.326-330.

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНТИСЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Базовое структурное подразделение – лаборатория Нейтронных исследований, разработки ведутся также в лабораториях Физики сегнетоэлектричества и магнетизма, Динамики материалов, физики ферроиков

твердых растворов Функциональные материалы на основе антисегнетоэлектрик/ сегнетоэлектрик привлекают к себе все большее внимание. Более 70% рынка пьезоматериалов занимает твердый раствор цирконата-титаната свинца PbZr , , , Ti , O , (ЦТС) с содержанием PbTiO3 порядка 50%. В последние годы возникли новые направления применения материалов с малым содержанием титана (<6%), имеющими при комнатной температуре антисегнетоэлектрическую (неполярную) структуру. Были проведены исследования структуры и динамики ЦТС с использованием рассеяния синхротронного излучения. Впервые было предложено описание антисегнетоэлектрического фазового перехода как нереализованного перехода в несоразмерную фазу. Показано, что структура ЦТС в области составов с максимальными значениями пьезоотклика является нанонеоднородной. Впервые продемонстрирована возможность управления антисегнетоэлектрической доменной структурой электрическим полем.

Регулярные исследования структуры и динамики сегнетоэлектриков и родственных материалов начались в группе нейтронных исследований (теперь лаборатория Нейтронных исследований) в начале 80-х годов прошлого века. Полученные результаты заложили основы понимания микроскопических механизмов фазовых переходов в сложных перовскитоподобных соединениях (в первую очередь релаксорах). В последние годы ведутся активные исследования антисегнетоэлектриков (АСЭ) и твердых растворов на их основе.

Интерес к исследованиям материалов на основе АСЭ вызван как широким практическим применением их твердых растворов в области составов, соответствующих так называемой Морфотропной Фазовой Границе (МФГ), так и нерешенными вопросами, касающимися микроскопического механизма фазовых переходов. Наряду с составами в области МФГ, наблюдается рост интереса к «антисегнетоэлектрическим составам», в частности к твердым растворам цирконата-титаната свинца (ЦТС) PbZr_{1-x}Ti_xO₃ с x<0.06. Интерес к таким материалам обусловлен возможностью их применения в быстрых устройствах накопления электрической энергии конденсаторного типа и в холодильниках на основе электрокалорического эффекта. Недавно, в работах А.К. Таганцева была предложена идея использования полярных антифазных доменных границ в АСЭ как основы для запоминающих устройств с высокой плотностью записи информации. Развитие всех указанных направлений применения требует детального понимания процессов перестройки структуры (как кристаллической, так и доменной) в функциональных материалах на основе АСЭ. Крайне важную роль при этом играет изучение критической динамики и деталей структуры на мезоскопических масштабах.

АСЭ фазовый переход в чистом цирконате свинца (ЦС)

Проблема механизма фазового перехода (ФП) в ЦС оказывается достаточно сложной. Структура ЦС в АСЭ фазе характеризуется сосуществованием двух параметров порядка (ПП): (1) АСЭ ПП, связанный с антипараллельными смещениями ионов свинца и описываемый приведенным волновым вектором qΣ=(¼ ¼ 0) и (2) антиферродисторсионный ПП, связанный с антифазными разворотами кислородных октаэдров в чередующихся слоях и описываемый приведенным волновым вектором qR=(½ ½ ½). Наряду с сосуществованием ПП, симметрия которых характеризуется 2-мя различными точками зоны Бриллюэна (3Б), в ЦС наблюдается критический рост диэлектрической проницаемости, что предполагает существование мягкой фононной моды в центре 3Б. Т.о. оказывается важным изучить особенности динамики решетки в окрестности трех различных точек зоны Бриллюэна.

Характерные размеры монокристаллов ЦС и его твердых растворов составляют менее 1 мм³. Это не позволяет использовать метод неупругого рассеяния нейтронов. Оптические методы не дают возможность изучать фононные ветви во всем объеме 3Б. Решением вопроса оказывается использование метода неупругого рассеяния рентгеновского (синхротронного излучения). Были выполнены измерения НРРИ в монокристаллах ЦС. Основной выявленной особенностью оказалось существование крайне мягкой дисперсионной ветви поперечных акустических (ТА) фононов в направлении 11[0] (Рис.1). По мере приближения к



Рисунок 1. Температурная эволюция фононной дисперсионной ветви в параэлектрической фазе цирконата свинца в направлении [qq0]. Сплошные линии – результат модельных расчетов.

ФП ТА ветвь смягчается в целом.

Было предложено описание АСЭ ФП в цирконате свинца в рамках модели с единственной мягкой модой – поперечной оптической модой (TO) в центре ЗБ. Смягчение TA ветви может при этом быть описано как результат флексоэлектрического межмодового взаимодействия. Сплошными линиями на рис. 1 показан результат описания температурной эволюции дисперсии TA фононов с единственным температурно-зависимым параметром – частотой мягкой TO моды.

Следует отметить, что из анализа приведенных дисперсионных кривых можно ожидать ФП при произвольном волновом векторе и вектор qΣ ничем не выделен. Однако ФП в АСЭ фазу является ФП I рода и не обязан описываться специфическим волновым вектором. Было показано [1], что стабилизация релевантного волнового вектора в ЦС на значении (¼ ¼ 0) может быть объяснено существованием при этом волновом векторе "umpklapp" члена в разложении свободной энергии, отсутствующего при произвольных значениях волнового вектора. Т.о. в рамках предложенной в [1] модели АСЭ ФП может быть описан, как несостоявшийся несоразмерный ФП.

Несоразмерные фазовые переходы в ЦС и ЦТС.

Выполненные исследования подтверждают возможность реализации несоразмерных фаз в перовскитоподобных антисегнетоэлектриках. Было показано, что приложение к ЦС гидростатического давления приводит к возникновению промежуточной несоразмерной фазы, описываемой волновым вектором qinc~0.2. Формированию соответствующих сверхструктурных пиков предшествует возникновению максимумов критического диффузного рассеяния в области этих волновых векторов. Измерения НРРИ подтвердили связь указанного максимума с минимумом на фононной дисперсионной кривой. Несоразмерная структура была также обнаружена в гафнате свинца (PbHfO3). Интересные результаты были получены при изучении критической динамики ЦТС в области малых (меньше 6%) концентраций титаната свинца. Было показано, что уже при х=0.015 возникновению АСЭ фазы предшествует формирование несоразмерной структуры с волновым вектором qinc≈0.16. Этому переходу в несоразмерную фазу предшествует возникновение аномалии на фононной дисперсионной кривой (Рис. 2).



Рисунок 2. Температурная эволюция фононной дисперсионной ветви в параэлектрической фазе ЦТС (x=0.015) в направлении [qq0].

Т.о. в этом случае оказывается возможным говорить о собственном несоразмерном фазовом переходе, как и в предыдущем случае, инициируемом межмодовым взаимодействием.

Управление АСЭ доменной структурой

Выше уже отмечалось, что весьма перспективным направлением практического применения антисегнетоэлектриков является создание устройств памяти на полярных антифазных доменных границах. Существование таких границ было подтверждено электронно-микроскопическими измерениями, а недавние исследования с использованием метода атомной силовой микроскопии пьезоотклика (АСМП) подтвердили полярный характер этих границ. При этом, однако, возникает вопрос возможности формирования доменной структуры в антисегнетоэлектрической фазе с заданной ориентацией доменов. АСЭ фаза является неполярной и поэтому приложение электрического поля не может оказывать непосредственное влияние на доменную структуру. Однако, в случае ЦТС с x<0.06 АСЭ фаза является стабильной, но ее формирование идет через промежуточную сегнетоэлектрическую (СЭ) фазу с возникновением узкой области существования несоразмерной фазы. Такая особенность фазовой диаграммы позволяет предположить возможность управления доменной структурой АСЭ фазы путем воздействия на промежуточную СЭ фазу. Исследования промежуточной фазы методом АСМП показывают, что в СЭ фазе возникает субмикронная доменная структура, причем приложение электрического поля может приводить к переключению доменов без формирования однодоменной или макродоменной структуры (Рис. 3).



Рисунок 3. Участок АСМП изображения ЦТС(4%). Хорошо видна субмикронная доменная структура. Красным квадратом выделена область, к которой было приложено электрическое поле. Правая вставка, показывает левую границу поляризованной области.

Метод АСМП, являясь крайне эффективным при изучении малых областей с размерами единицы или десятки микрон, однако, не может использоваться для изучения средней по образцу структуры. Кроме того, АСМП, к сожалению, не может использоваться при высоких температурах. Для изучения антифазных доменов и доменных стенок в ЦТС был использован метод рассеяния рентгеновского (синхротронного) излучения, для чего была создана специальная ячейка образца, позволяющая проводить измерения малых монокристаллов при приложении электрического поля в условиях высокой температуры.

На рис. 4 приведена двумерная карта распределения интенсивности рассеяния в плоскости (h0l) обратной решетки. При отсутствии электрического поля (левая часть рисунка) интенсивности перпендикулярных семейств отражений с векторами антисегнетоэлектричества $q_{AE} q_{AE} (\frac{1}{4} 0 \frac{1}{4})$ и (- $\frac{1}{4} 0 \frac{1}{4}$) имеют одинаковую интенсивность, что говорит о равной концентрации соответствующих АСЭ доменов. Вокруг сверхструктурных отражений хорошо видны вытянутые «шлейфы» диффузного рассеяния. Эти шлейфы обусловлены рассеянием на плоских антифазных доменных границах (стенках). Анализ распределения интенсивности позволил определить среднюю толщину стенки, которая составила порядка 4nm, что подтверждает перспективность их использования, как основы устройств памяти с высокой ппотностью записи.

На правой части рисунка приведена картина рассеяния при охлаждении кристалла в электрическом поле 5kV/cm из кубической фазы. Хорошо видно, что сверхструктурные отражения с векторами qAF перпендикулярными направлению поля (т.е. с направлениями смещений вдоль поля) оказываются сильно подавленными, а рассеяние на стенках полностью исчезает. Этот результат полностью подтверждает идею о возможности управления ACЭ доменами и антифазными доменными границами электрическим полем в системах с промежуточной CЭ фазой.

Итак, на основании проведенных экспериментальных исследований функциональных материалов на основе антисегнетоэлектриков впервые предложена простая «одномодовая» модель АСЭ фазового перехода. Предсказана и экспериментально подтверждена возможность формирования несоразмерных фаз. Впервые в соединениях этой группы обнаружено рассеяние рентгеновского излучения на антифазных доменных границах и продемонстрирована возможность



T=190C, E=5kV/cm



Рисунок 4. ЦТС (1.5%) Двумерная карта распределения интенсивности рассеяния в АСЭ фазе. Левая часть – в отсутствии электрического поля. Правая, при приложении поля 5kV/cm. Направление приложения поля показано стрелкой. использования методов рассеяния для определения параметров этих границ. Предложен способ управления конфигурацией АСЭ доменов электрическим полем в кристаллах с промежуточной СЭ фазой. Этот способ открывает пути практической реализации предложенного ранее подхода для создания устройств памяти на полярных антифазных доменных границах.

Публикации

- Andreeva,NV; Vakulenko,AF; Petraru,A; Soni,R; Kohlstedt,H; Filimonov,AV; Rudskoy,AI; Vakhrushev,SB; Pertsev,NA «Lowtemperature dynamics of ferroelectric domains in PbZr0.3Ti0.7O3 epitaxial thin films studied by piezoresponse force microscopy «, Appl. Phys. Lett., v.107, 15 ArtNo: #152904 (2015).
- Burkovsky,RG; Bronwald,I; Andronikova,D; Wehinger,B; Krisch,M; Jacobs,J; Gambetti,D; Roleder,K; Majchrowski,A; Filimonov,AV; Rudskoy,AI; Vakhrushev,SB; Tagantsev,AK "Critical scattering and incommensurate phase transition in antiferroelectric PbZrO3 under pressure" Sci. Rep., v.7 ArtNo: #41512 (2017).
- Andronikova, DA; Bronwald, IA; Burkovsky, RG; Leontiev, IN; Leontiev, NG; Bosak, AA; Filimonov, AV; Vakhrushev, SB, "Pretransitional evolution of central peaks and transverse acoustic phonon branch in single crystal lead zirconate titanate with Ti concentration 0.7%" J. Phys.: Conf. Ser., v.769, 1 ArtNo: #012070 (2016).
- 4. Bronwald, I; Andronikova, D; Burkovsky, R; Chernyshev, D;

Leontiev,NG; Leontiev,IN; Ye,ZG; Vakhrushev,S, "Composition dependence of the diffuse scattering in cubic PbZr1-xTixO3", Ferroelectrics, 503, 45-51 (2016).

- Andreeva,NV; Pertsev,NA; Andronikova,DA; Filimonov,AV; Leontiev,NG; Leontyev,IN; Vakhrushev,SB, "Domain structures and correlated out-of-plane and in-plane polarization reorientations in Pb(Zr0.96Ti0.04)O3 single crystal via piezoresponse force microscopy" AIP Adv., 6 ArtNo: #095211 (2016).
- Andronikova, Daria; Bronwald, Yurii; Burkovsky, Roman; Chernyshev, Dmitry; Filimonov, Alexey; Nacke, Bernard; Ye Zuo-Guang; Vakhrushev, Sergey, Critical X-ray scattering in mixed piezoelectric material PbZr0.6Ti0.4O3. Solid State Phenomena ., Vol. 245, p211-216. (2016).
- Андроникова Д.А., Босак А.А., Бронвальд Ю.А., Бурковский Р.Г., Вахрушев С.Б., Леонтьев Н.Г., Леонтьев И.Н., Таганцев А.К., Филимонов А.В., Чернышов Д.Ю. « Критическое рассеяние синхротронного излучения в цирконате-титанате свинца с малой концентрацией титана» ФТТ, т.57, № 12 с: 2368 (2015).
- Burkovsky,RG; Andronikova,D; Bronwald,Yu; Krisch,M; Roleder,K; Majchrowski,A; Filimonov,AV; Rudskoy,AI; Vakhrushev,SB Lattice dynamics in the paraelectric phase of PbHfO3 studied by inelastic x-ray scattering» J. Phys.: Condens. Matter, v.27, 33 ArtNo: #335901 (2015).
- Andronikova,DA; Burkovsky,RG; Filimonov,AV; Tagantsev,AK; Vakhrushev,SB, Phonon dispersion calculations using the Vaks model in antiferroelectric lead zirconate» J. Adv. Dielectr., v.5, 2 ArtNo: #1550016 (2015).

ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Базовое структурное подразделение – лаборатория Мощных полупроводниковых приборов, разработки ведутся также в лаборатории Неравновесных процессов в полупроводниках

Исследования направлены на повышение эффективности преобразования энергии в водородных топливных элементах. В результате: создана физико-химическая концепция электродных процессов в электрохимических электродах, содержащих наноструктурированные формы функционализированного углерода; создан новый класс электродных материалов для электрохимической энергетики, содержащих наноструктурированные формы функционализированного углерода с высокой эффективностью преобразования энергии.

В электрохимических системах преобразования энергии происходят процессы, результатом которых является преобразование химической энергии в электрическую и наоборот. Эти процессы могут идти как в ту (химическая в электрическую) так и в другую (электрическая в химическую) сторону. В первом случае речь идет, например, о различных батарейках, топливных элементах, в которых энергия, находящаяся в топливе преобразуется в электроэнергию. Во втором, можно говорить, например, об электролизерах, через которые необходимо пропустить электрический ток с тем, чтобы получить какое-либо вещество (металлическое покрытие, хлор и т.д.). Существуют устройства, в которых имеют место и тот и другой случай. К ним относятся электрические аккумуляторы (свинцовые, литий-ионные и др.), суперконденсаторы. В процессе заряда происходит конверсия электрической энергии в химическую, которая накапливается в устройстве. При использовании же этого устройства идет обратный процесс, то есть, оно генерирует электрический ток (рис. 1).

Общим и важнейшим показателем подобных электрохимических систем является эффективность процесса преобразования энергии. В низкотемпературных топливных элементах в силу низкой температуры (не больше 100 С) электрохимические процессы протекают медленно, и для их ускорения используют дорогостоящие материалы, такие как платина и платиновые металлы. Одним из показателей, часто используемых для сравнения эффективности различных систем, является количество грамм платины необходимое для достижения 1 кВт электрической мощности. Важной характеристикой является и так называемая плотность мощности, то есть какая мощность может быть получена с 1 см² поверхности электрода.

Отличительной особенностью подобных электрохимических систем является то, что в них переносятся заряды двух типов: электроны и ионы. Каждый тип заряда переносится по отдельному материалу: электроны по углероду, ионы, как правило, по специальному полимерному материалу. В низкотемпературных топливных элементах это в большинстве случаев так называемый Nafion (в некотором смысле «родствен-



Рисунок 1 – Схема работы топливного элемента

ник» полиэтилена, из которого изготовлены известные упаковочные пакеты). Из этого следует, что электроды должны содержать эти материалы в необходимых пропорциях. Кроме того процесс идет с участием окислителя (кислород) и топлива (водород, метанол и др.) Процессы идут на поверхности каталитически активной компоненты (платина) электрода. То есть, для обеспечения высокой скорости процесса необходима еще и развитая поверхность, а для того, чтобы вещества свободно поступали к этой поверхности, необходима высокая пористость с порами достаточного размера.

Поверхность платины, как химически активного материала имеет тенденцию покрываться различными веществами при контакте с ними. При этом активность платины существенно снижается, что приводит к ухудшению эффективности электрода. Платину могут блокировать как газообразные вещества (оксид углерода, кислород и др.), так и сам Nafion, при контакте с ней (рис. 2).

Сложность создания эффективного электродного материала состоит в необходимости выдерживания определенного соотношения количеств компонентов в сочетании с созданием такой структуры, которая бы обеспечивала большую площадь поверхности и была бы легко проницаема для реагентов (окислителя и топлива).

Разработки Института направлены на увеличение эффективности преобразования энергии в низкотемпературных топливных элементах с тем, чтобы увеличить коэффициент полезного действия, плотность мощности устройства, мощность, приходящуюся на грамм платины.



Рисунок 2 – Структура активного слоя



Рисунок 4 – Вольтамперная и мощностная характеристики мембранноэлектродного блока на основе разработанного электродного материала (НАНГ-82; О,/Н,; 2 атм; 80°С; загрузка Pt ~0.1 мг /см²)

Отметим три ключевых достижения, которые позволили увеличить эффективность водородного топливного элемента:

- Использование в составе электродов материалов (углеродные нанотрубки, углеродные нановолокна), имеющих на своей поверхности кислородсодержащие группы атомов, которые в процессе функционирования электрода постоянно очищают поверхность платины. В результате электрохимические процессы идут в 2-4 раза быстрее.
- Использование в составе электрода углеродных нановолокон отечественного производства,



Рисунок 3 – Микрофотография углеродных нановолокон



Рисунок 5 – Фотография мембранно-электродного блока

имеющих оптимальную структуру пор для беспрепятственного доступа окислителя и топлива к поверхности платины (рис. 3).

 Создание островковой структуры полимера Nafion, в результате которой он блокирует существенно меньшую часть поверхности платины.
 Это позволило увеличить эффективность использования платины и уменьшить ее количество до 0.1 г на 1 кВт мощности (целевой показатель, сформулированный Министерством энергетики США на 2020 г.).

Фундаментальным результатом явились новые знания о процессах и механизмах, протекающих в рассматриваемых материалах, создание физико-химической концепции электродных процессов в электрохимических электродах, содержащих наноструктурированные формы функционализированного углерода.

Прикладным результатом явилось создание нового класса электродных материалов для электрохимической энергетики, содержащих наноструктурированные формы функционализированного углерода, с высокой эффективностью преобразования энергии. Характеристики улучшенного композитного катода (рис.4 и рис.5):

- плотность габаритной мощности не менее 1 Вт/см²;
- КПД ≈ 0.5;
- удельная загрузка платины не более 0.1 г/кВт.

Результаты могут быть использованы при проектировании и изготовлении водородных топливных элементов, электролизеров воды и комбинированных электрохимических систем прямого преобразования энергии с увеличенной эффективностью.

Публикации

- Leontyev I.N., Leontyeva D.V., Kuriganova A.B., Popov Y.V., Maslova O.A., Glebova N.V., Nechitailov A.A., Zelenina N.K., Tomasov A.A., Hennet L., Smirnova N.V. Characterization of the electrocatalytic activity of carbon-supported platinum-based catalysts by thermal gravimetric analysis // Mendeleev Communications. 2015. V. 25, issue 6. P. 468
- Глебова Н.В., Нечитайлов А.А., Краснова А.О., Томасов А.А., Зеленина Н.К. Катод водородного топливного элемента с модифицированными структурой и гидрофобностью // ЖПХ. 2015. Т. 88, вып. 5 С. 726-731
- Краснова А.О., Глебова Н.В., Нечитайлов А.А. Технология и структурные характеристики электродного материала системы Pt/C-Tayнит MД-Nafion // ЖПХ. 2016. Т. 89, вып. 6. С. 756-761
- Глебова Н.В., Нечитайлов А.А., Краснова А.О., Томасов А.А., Зеленина Н.К. Особенности структурообразования и электрохимические характеристики катода водородного топливного элемента в присутствии гидрофобизатора и углеродных нанотрубок // Электрохимия. 2017. Т.53, вып. 2. С. 227-232
- Глебова Н.В., Краснова А.О., Томасов А.А., Зеленина Н.К., Нечитайлов А.А. Развитие метода измерения диффузионного сопротивления структур электродных материалов пористых электродов на основе протонпроводящегоиономера и углеродных наноматериалов // ЖТФ.2017. Т.87 №12. С. 1865-1870

КОМПОЗИТНЫЕ «ПОЛИМЕР-НЕОРГАНИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ» МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Базовое подразделение – лаборатория неровновесных процессов в полупроводниках

Нанокомпозитные материалы на основе проводящих полимеров и неорганических наночастиц представляют большой интерес в связи с бурным ростом их практического применения в устройствах органической электроники, таких как органические светодиоды (ОСД), органические полевые транзисторы (ОПТ), солнечные элементы (СЭ), ячейки памяти и др. Интеграция на наноуровне органических (полимер) и неорганических (наночастицы) материалов приводит к созданию оптоэлектронных структур, совмещающих технологичность трехмерной (3D) полимерной матрицы с уникальными электрическими и оптическими свойствами неорганических наночастиц (0D квантовые точки с размерами менее 10 nm), где оба компонента композитов работают совместно. Такие устройства на основе гибридных (полимер-неорганические наночастицы) материалов совместимы с технологией гибкой печатной органической электроники, которая является в настоящее время одной из самых перспективных технологий, благодаря ее высокой производительности и низкой себестоимости. В композитных активных слоях ОСД на основе сопряженных полимеров и полупроводниковых неорганических наночастиц длина волны излучения ОСД контролируется видом полимеров, типом и размером наночастиц, соотношением их концентраций, а также приложением внешнего электрического поля. Процесс генерации возбужденных состояний в таких композитных пленках включает в себя формирование синглетных и эксиплексных состояний, а также перенос энергии и заряда между компонентами композитов, который может управляться электрическим полем. Одним из перспективных путей создания белых ОСД является комбинация в активном слое приборов двух или трех полимеров, излучающих в различных областях спектра, что позволяет управлять цветом излучения, или путем

легирования более широкозонного материала узкозонным, при этом более широкозонный материал является средой для переноса носителей заряда.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе имеет многолетний опыт и большой научный задел в области разработки и исследования электрических и оптических свойств новых композитных материалов на основе проводящих полупроводниковых полимеров и неорганических материалов, включающих в себя полупроводниковые наночастицы, частицы графена и оксида графена, металлоорганические перовскиты и нанокристаллы перовскитов и др. В рамках изложенного выше подхода были получены и исследованы гибридные (полимер- наночастицы ZnO) активные слои для ОСД и белых ОСД на основе полимеров, легированных полимерными наночастицами, излучающие в различных диапазонах видимого спектра. Было показано, что в композитных активных слоях ОСД на основе сопряженных полимеров и полупроводниковых наночастиц ZnO длина волны излучения контролируется видом полимеров, типом и размером наночастиц, соотношением их концентраций, а также приложением внешнего электрического поля. Были получены и исследованы свойства ОПТ и ячеек памяти на основе композитов из полимеров и частиц графена (оксида графена - GO) [1,2]. Было установлено, что на величину подвижности ОПТ на основе композитов «проводящий полимер PFO – частицы GO» оказывает влияние «темплэйт эффект» - ориентация частиц GO в канале ОПТ [1]. Наблюдаемые в таких композитах эффекты переключения и возникновение проводящего канала при приложении напряжения связаны с присутствием вакансий кислорода и электронных ловушек в частицах графена и GO. Это приводит к переходам от sp² к sp³ гибридизации (и обратно) и к частичному восстановлению r-GO [3].



Рисунок 1. Структура (а) и интенсивность эмиссии амбиполярного СИ-ОПТ на основе пленки PFO:ZnO (b).

Были проведены исследования эффектов памяти в ОПТ структурах с активным слоем на основе пленок производных карбазола (PVK и PEPK) с наночастицами Au, которые проявляются в гистерезисе переходных характеристик ОПТ на основе PEPK:Au (Au – 5-10 wt.%). Полевая подвижность носителей заряда в композитном слое при 300 К, μ_{OTT} (300 К), в режиме насыщения для таких ОПТ μ_{ont} ~ 0,04 cm²/Vs оказалась намного выше, чем значения µОПТ (300 К) для чистого PEPK (~10-4 - 10-5 cm²/Vs), что связано с вкладом в подвижность металлических наночастиц. ОПТ на основе РЕРК:Аи обладают большим и воспроизводимым гистерезисом переходных характеристик, что характерно для приборных структур многоразовой памяти. Наблюдаемые эффекты связаны с особенностями транспорта в структуре PEPK:Au, где наночастицы Au выполняют функцию среды накопления заряда. Были также исследованы фотоиндуцированные эффекты памяти в ОПТ с активным слоем на основе композитных пленок полимера - РVК и наночастиц Ni. Показано, что в таких структурах при концентрациях Ni ~5-10 wt.% наблюдаются вольт-амперные характеристики (ВАХ), характерные для амбиполярного транспорта.

При этом введение в полимерную матрицу наночастиц Ni приводит к росту подвижности носителей заряда в активном слое ОПТ достигающей ~ 1.3 cm²/Vs и ~ 1.9 cm²/Vs для электронов и дырок соответственно. Фоточувствительность в таких структурах связана с особенностями транспорта в пленках PVK-Ni, механизм которого определяется модуляцией проводимости рабочего канала ОПТ падающим светом и напряжением на затворе. Это позволит создавать на основе таких структур многоразовые ячейки памяти с оптической записью и электрическим стиранием информации, а также фоточувствительные элементы оптронных пар.

Новым направлением в области органической электроники являются светоизлучающие органические полевые транзисторы (СИ-ОПТ), совмещающие в себе эмиссионные свойства ОСД и переключающие свойства ОПТ. Были получены и исследованы СИ-ОПТ с композитными активными слоями на основе растворимых полупроводниковых полимеров (РFO, MEH-PPV) и наночастиц ZnO с концентрациями ZnO от ~ 17 до 50 wt.%, которые работают в униполярном и в амбиполярном режимах (Рис. 1).

Полевая подвижность носителей заряда (µопт) при

300 К в амбиполярных СИ-ОПТ на основе PFO:ZnO (1:0,2) достигала значений ~ 0,02 cm²/Vs и ~ 0,03 cm²/ Vs для электронов и дырок соответственно, а в униполярных СИ-ОПТ PFO:ZnO (1:1) возрастала до ~ 2 cm²/ Vs, что сравнимо с максимальными µопт для проводящих полимеров. СИ-ОПТ с активными слоями на основе PFO:ZnO и MEH-PPV:ZnO излучают свет в зеленом и оранжевом диапазонах оптического спектра соответственно, что совпадает со спектральными областям излучения полимерных матриц. Обнаружено падение интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) композитных пленок MEH-PPV:ZnO с ростом концентрации наночастиц ZnO и с уменьшением температуры в диапазоне Т = 90-297 К. В амбиполярных композитных СИ-ОПТ положение зоны излучения может сдвигаться вглубь активного слоя при приложении смешения на стоке-истоке и затворе, что снижает потери, связанные с безизлучательной рекомбинацией на электродах и позволяет в перспективе, разработать полимерные инжекционные лазеры на их основе.

Наряду с исследованиями свойств новых материалов в видимом диапазоне оптического спектра, нами проводились исследования оптических и электрических свойств в терагерцовой области частот ряда проводящих полимерных материалов, находящихся как на диэлектрической (PFO), так и на металлической (графитизированные пленки легированного иодом геликоидального полиацетилена) стороне перехода метал диэлектрик. Было исследовано влияние модификации полупроводникового полимера (PFO) частицами оксида графена на терагерцовый электромагнитный отклик [4]. Был выполнен теоретический анализ обменного механизма переноса энергии между неорганическими квантовыми точками, показано, что для количественного описания процесса переноса энергии обменный вклад в вероятность переноса должен приниматься во внимание при расстояниях между квантовыми точками, близких к контактным. Были исследованы спектры поглощения и ФЛ композитных пленок MEH-PPV:ZnO в зависимости от концентрации наночастиц ZnO и температуры. Показано, что при понижении температуры при малых концентрациях наночастиц ZnO наблюдается рост интенсивности линий ФЛ композита, связанных с MEH-PPV и ZnO, в то время как при больших концентрациях ZnO интенсивность этих линий падает. При этом наблюдалось сужение ширины линии ФЛ композита, относящейся к MEH-PPV как с понижением температуры, так и с ростом концентрации ZnO, что позволяет создавать композитные материалы для ОСД с заранее заданными свойствами.



Рисунок 2. Температурная зависимость подвижности (а) и интенсивность эмиссии СИ-ОПТ на основе PFO: CsPbl, (b) [6].

Были получены композиты и проведены исследования электрических и оптических свойств металлоогранических перовскитов на основе пленок CH₂NH₂PbBr₂ (I₂) [5] – новых материалов для СЭ (в 2018 г. мировой рекорд в их КПД достиг ~ 23.3 %) и ОПТ структур на их основе. Было показано, что ОПТ на основе пленок CH₂NH₂PbBr₂ демонстрируют BAX, характерные для амбиполярных ОПТ с режимом насыщения. Обнаружено, что передаточные характеристики ОПТ на основе CH₂NH₂PbBr₂ обладают незначительным гистерезисом и слабо зависят от напряжения на стоке-истоке. Значения подвижности носителей заряда (дырок), рассчитанные из ВАХ ОПТ на основе CH₂NH₂PbBr₂ при 300 К в режимах насыщения и слабых полей, составили ~ 5 cm²/Vs и ~ 2 cm²/Vs соответственно, а подвижность электронов ~ 3 cm²/Vs, что превышает значения подвижности ~ 1 ст²/Vs, полученные другими авторами для подобных ОПТ на основе CH₂NH₂Pbl₂. В развитие этих работ нами были впервые получены и исследованы свойства ОПТ на основе пленок из композита «сопряженный полимер PFO - нанокристаллы перовскитов (CsPbl₃)» [6].

Было показано, что ОПТ на основе пленок PFO:CsPbl₃ демонстрируют BAX, характерные для ОПТ с преобладанием дырочного транспорта с эффектом насыщения тока при температурах 200 - 300 К. Было обнаружено, что PFO:CsPbl₃ ОПТ имеют незначительный гистерезис выходных и передаточных характеристик особенно при температурах ниже 250 К. Значения подвижности дырок, оцененные из BAX PFO:CsPbl₃ ОПТ, составили ~ 2,4 10⁻¹ cm²/Vs и ~ 1,9 10⁻¹ cm²/Vs в режимах насыщении и слабых полей соответственно при 300 К. При понижении температуры подвижность дырок в режимах насыщения и слабых полей снижалась до ~ 6 10⁻³ cm²/Vs и 2,8 10⁻³ cm²/Vs соответственно при 200 К, а затем до 5,5 10⁻⁵ cm²/Vs при 100 К (в режиме слабых полей), что характерно для прыжковой проводимости. Была обнаружена значительная фоточувствительность (рост тока в 2 раза при облучении имитатором солнечного света) PFO:CsPbl₃ ОПТ при 300 К. Был продемонстрирован светоизлучающий эффект при приложении отрицательных импульсов напряжения к стоку–истоку и затвору PFO:CsPbl₃ ОПТ при 300 К. Установлено, что основным механизмом переноса носителей заряда в ОПТ на основе гибридных пленок PFO:CsPbl₃ является прыжковый транспорт [6].

Полученные результаты указывают на перспективность применения новых композитных наноматериалов на основе проводящих полупроводниковых полимеров и неорганических наночастиц, частиц графена, нанокристаллов перовскитов в качестве активных слоев ОСД, ОПТ, СИ-ОПТ и в многоразовых ячейках памяти, т.е. в наиболее важных компонентах современной гибкой печатной органической электроники.

Имеющийся научный опыт в получении и исследовании электрических и оптических свойств новых полимерных и композитных пленок, а также исследовании механизмов транспорта носителей заряда в полимерных пленках и полимерных нанопроводах являются основанием для успешных дальнейших исследований в этой быстро развивающейся научной области.

Публикации

- 1. A. N. Aleshin, et al., Organic Electronics, 16, 186 (2015).
- П. С. Крылов, А. С. Берестенников, А.Н. Алешин, и др., ФТТ, 57, 1639 (2015).
- 3. A. N. Aleshin, et al., Synthetic Metals, 217, 7 (2016).
- 4. А.В. Андрианов, А.Н. Алешин, ПЖТФ 42, 56 (2016).
- 5. А. Н. Алешин, и др., ФТТ, 59(12) 2457 (2017).
- 6. A. N. Aleshin et al., Organic Electronics, 50, 213 (2017).

СОЗДАНИЕ ВОЛОКОН ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА С ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, СОПОСТАВИМЫМИ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ ОЦЕНКАМИ

Базовое подразделение – лаборатория Физики прочности

Создание принципиально нового вида полимерных волокон, обладающих сочетанием необычайно высоких прочностных и теплофизических показателей, предопределяет прогресс многих отраслей современной техники. Разработанный за рубежом в 80-х годах прошлого столетия новый гель-технологический процесс получения волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), несомненно, относится к числу прорывных технологий, так как впервые позволил радикально улучшить комплекс физико-механических и теплофизических свойств гибкоцепных полимеров.

Достигнутые уже в то время для промышленной продукции значения прочности σ = 3 ГПа и модуля упругости E = 110 ГПа в несколько раз превосходят аналогичные значения для широко используемых крупнотоннажных полимеров – полипропилена, полиэтилентерефталата, найлона-6 и др. Это позволяет отнести гель-волокна СВМПЭ к категории сверхпрочных и высокомодульных материалов наряду с углеродными, кварцевыми, базальтовыми, борными и другими волокнами.

Неоспоримым преимуществом СВМПЭ волокон являются их удельные (на единицу массы) физико-механические показатели, устойчивость к действию влаги и солнечной радиации, радиопрозрачность, химическая и биологическая инертность. Из этих волокон могут быть получены легкие композиционные материалы нового поколения с рекордными значениями ударной (баллистической) прочности. Совокупность этих уникальных свойств предопределила тот факт, что более 50% всего мирового производства волокон СВМПЭ стало использоваться на изготовление конструкционных материалов в качестве средств индивидуальной и коллективной бронезащиты живой силы и техники, элементов конструкций ракет, самолетов, в судостроении и т.д., т. е. в тех случаях, когда фактор веса изделия играет решающую роль.

Несмотря на то, что механические характеристики волокон СВМПЭ существенно выше, чем в остальных гибкоцепных полимерах, однако достигнутые значения прочности и модуля существенно ниже их теоретических оценок: σ = 15 ГПа и Е = 300 ГПа при комнатной температуре. Следовательно, имеется несомненный резерв для дальнейшего улучшения свойств волокон СВМПЭ, но его реализация – весьма сложная задача, поскольку с момента налаживания промышленного производства на фирмах DSM (Голландия) и Honeywell (США) уже на протяжении почти 40 лет особого прогресса в улучшении свойств выпускаемой продукции не наблюдается, несмотря на большое количество исследовательских работ по гель-технологии во всем мире. Очевидно, это связано как с технологическими сложностями процесса, так и, в основном, с недостаточным пониманием природы и закономерностей физических процессов, протекающих на многих стадиях переработки материала.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе на основе фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований сформулирована принципиально новая концепция — структурно-кинетический подход к проблеме упрочнения полимеров, позволяющий дать физическое обоснование модернизации многоступенчатого гель-технологического метода получения сверхпрочных и высокомодульных волокон СВМПЭ.

Физическими основами предлагаемого подхода являются представления С.Н. Журкова о кинетической природе разрушения твердых тел и представления о важной роли молекулярной и надмолекулярной структуры полимеров в процессе ориентационного упрочнения, разработанные сотрудниками лаборатории Физики прочности.

Упрочнение, осуществляемое под действием растягивающих напряжений и температуры, рассматривается как суперпозиция двух одновременно протекающих и конкурирующих процессов:

1) упрочнения, достигаемого за счет анизотропного выстраивания выпрямленных молекул вдоль оси ориентации в результате структурных трансформаций на молекулярном и надмолекулярном уровнях организации исходных неориентированных полимеров,

 разупрочнения, обусловленного несколькими причинами – термофлуктуационными разрывами химических связей, образованием субмикро- и микроскопических трещин, полос сброса, релаксационными явлениями и структурной реорганизацией вследствие отжига.

Поскольку все эти процессы (по Аррениусу - Журкову) экспоненциально зависят от температуры и механического напряжения, необходимо выявлять взаимосвязь феноменологических закономерностей упрочнения с физико-химическими явлениями на различных уровнях структурной организации полимеров при комплексном использовании современных физических методов.

Нами показано, что молекулярно-массовые характеристики и, особенно, структура полимера в исходном неориентированном состоянии (так называемые прекурсоры) радикально влияют на кинетику развития двух конкурирующих процессов на всех стадиях ориентационного упрочнения. Особые преимущества гель-технологии по сравнению с обычной расплавной технологией обусловлены возможностью формирования в прекурсоре специфической надмолекулярной структуры типа кристаллического мата из наслоенных складчатых ламеллярных кристаллов (Рис. 1), при растяжении которого удается достигнуть существенно более высоких степеней ориентации макромолекул при



Рисунок 1. Надмолекулярная организация прекурсора СВМПЭ

одновременном снижении отрицательных факторов.

Формирование подобной структуры прекурсоров осуществляется при растворении продуктов синтеза СВМПЭ в виде порошков (насцентные порошки) обычно либо в декалине, либо в минеральном масле при повышенных температурах и интенсивном перемешивании (так называемые прядильные растворы) и последующей кристаллизации растворенного полимера при охлаждении. Обычно считается, что растворение происходит на молекулярном уровне с полным разрушением сложной иерархической структурной организации порошка.

Однако выяснилось, что существует своеобразная «структурная память» порошка. Это потребовало проведения сравнительных исследований строения большой группы насцентных порошков, синтезированных на различных каталитических системах, нахождение условий приготовления прядильных растворов и условий формирования из них гель-образцов с оптимальным типом надмолекулярной организации (HMO). В результате сформулированы необходимые критерии оценки оптимальной HMO (Рис. 2) порошков и условий их синтеза, которые повышают эффективность процесса деформационного упрочнения и способствуют достижению более высоких физико-механических и теплофизических свойств волокон СВМПЭ, что составляет важный «структурный» аспект модернизации метода гель-технологии.



Рисунок 2. Надмолекулярная организация насцентного порошка СВМПЭ.

Структурно-кинетический подход позволил внести существенные положительные изменения на решающем этапе гель-технологии – деформационном упрочнении сформированных прекурсоров СВМПЭ. Прежде всего, обоснован принципиально важный вывод – необходимость проведения многоступенчатого зонного высокотемпературного ориентирования. Причём температурно-силовые режимы упрочнения должны быть строго подобраны для каждого этапа в зависимости от природы различных физических процессов, играющих основную роль в трансформации структуры на молекулярном и надмолекулярном уровнях организации на этом этапе. Основная задача – нахождение условий, при которых эффекты упрочнения доминируют над эффектами разупрочнения.

В предложенной концепции очень важное значение придается первому этапу – образованию «шейки», при котором в результате процесса рекристаллизации под действием растягивающих напряжений (кристалл из складчатых цепей – кристалл из выпрямленных цепей) происходит перестроение ламеллярной структуры прекурсора в нанофибриллярную структуру ориентированного состояния. Оказывается, что нанофибриллы гетерогенны вдоль своей длины и состоят из регулярно чередующихся кристаллических и дефектных неупорядоченных областей. Именно степень дефектности этих участков и возможность уменьшения ее при дальнейшем растяжении и определяют уровень достижения конечных физико-механических и теплофизических свойств ориентированных волокон. На основании структурных данных была предложена оригинальная схема (см. рисунок 3) строения дефектных областей в нанофибриллах, включающая элементарные конформационные дефекты типа кинков (4), двойных перегибов (2), спиралей из гош-конформеров (3) и т.д. Совершенствование этой структуры в поле механических сил возможно за счет диффузии дефектов через кристаллиты, исчезновения их на концах молекул или при аннигиляции дефектов разных знаков.

Установлена взаимосвязь между дефектностью в ламелярных образованиях прекурсора и в нанофибриллах, что и определяет необходимость поиска оптимального типа насцентного порошка, формирования наиболее совершенной ксерогель-структуры прекурсора и нахождение условий рекристаллизации в «шейке» через жидко-кристаллическое состояние.

После прорастания «шейки» через весь образец дальнейшее ориентирование осуществляется за счет



Рисунок 3. Схема строения дефектных областей в нанофибриллах СВМПЭ. I₀₀₂ – продольный размер кристаллита, I₁₁₀- поперечный размер кристаллита 1 – выпрямленные транс-отрезки молекул полиэтилена; 2, 3, 4 – конформационные дефекты – двойные перегибы, спирали из гош-конформеров, кинки, соответственно. другого физического процесса – пластической деформации образовавшейся фибриллярной структуры друг относительно друга по механизму скольжения – залипания с преодолением активационного барьера. Для повышения эффективности этого процесса деформирование необходимо проводить в «затрудненных условиях» при поэтапном ступенчатом повышении температуры и соответствующем подборе величины ориентирующего усилия таким образом, чтобы, с одной стороны, добиться устранения дефектов в неупорядоченных областях и, с другой стороны, не допустить развития релаксационных процессов.

Предельно высокие степени ориентационного удлинения, а, следовательно, и максимально достижимые значения прочности и модуля, достигаются при использовании на последних этапах процесса очень высоких температур, даже превышающих температуру плавления полиэтилена в ненапряженном состоянии. Значения ориентирующих напряжений при этом практически достигают значений разрывной прочности волокна при температуре ориентирования. Поэтому, процесс упрочнения необходимо осуществлять при использовании локальных нагревателей, позволяющих сократить до минимума время пребывания узкой части волокна в экстремальных условиях, тогда как основная часть волокна находится при комнатной температуре.

При использовании предложенного структурно-кинетического подхода в ФТИ им. А.Ф. Иоффе были изготовлены ультраориентированные сверхпрочные и высокомодульные пленочные нити СВМПЭ, для которых впервые был получен большой массив данных (50 идентичных образцов) - значений разрывной прочности и модуля упругости.

Прежде всего, подчеркнем, что в отличие от опубликованных в мировой литературе данных впервые для волокон СВМПЭ оказалось возможным провести статистический анализ этого массива данных при использовании подходов Вейбулла, развитых для хрупких материалов. Результаты анализа показывают, что можно отчетливо выделить две группы: 1) 20% образцов с относительно пониженными значениями прочности σ = 4,0 – 4,1 ГПа, для которых характерно узкое распределение значений прочности, и 2) 80% образцов с широким распределением значений прочности от σ = 4,3 ГПа до рекордных в мировой практике значений σ = 5,9 – 6,5 ГПа. Значения начального модуля для этих образцов достигают также рекордных величин Е = 230 ГПа, а предразрывные деформации є = 3-5 %, т.е. эти волокна СВМПЭ можно отнести уже к квази-хрупким материалам. Действительно, оба типа выше полученных распределений подчиняются статистике Вейбулла. Это позволяет утверждать, что разрушение этих материалов обусловлено наличием опасных макроскопических поверхностных трещин. Наши структурные исследования показали, что источниками возникновения опасных магистральных трещин являются крупномасштабные ротационные дефекты - полосы сброса (Рис. 4).

Следует отметить, что полученные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе значения физико-механических характеристик для сверхориентированных образцов



Рисунок 4. Полосы сброса, возникающие при изгибе предельно ориентированных волокон СВМПЭ.

СВМПЭ существенно (в 1,5 – 2 раза) превосходят значения разрывной прочности σ = 3,6 ГПа и начального модуля E = 116 ГПа, приводимые в рекламных проспектах для наиболее прочных в мире промышленных волокон типа SK76 фирмы DSM, Голландия.

Впервые для сверхориентированных гель-волокон показано, что их температура плавления T_m = 416 К и интервал плавления ∆T_m = 0,05 К уже соответствуют равновесным значениям для идеального кристалла полиэтилена. Однако, другие методы (рентгеновская дифракция, ИК- и Раман-спектроскопия) свидетельствуют, что в этих волокнах все же присутствуют в малых концентрациях локальные кластеры из конформационных дефектов типа дисклинаций и кинков, которые приводят к нарушению параллельности определенной доли сегментов макромолекул, а, следовательно, и к потере механических свойств.

Поэтому для реализации все еще остающихся резервов достижения теоретически возможных максимальных значений физико-механических параметров (статистически достоверных трехкратных по прочности и 30-40%-х по модулю упругости) необходимы комплексные исследования природы дефектной структуры предельно ориентированных волокон и установление причин возникновения полос сброса как основной причины прекращения деформационного упрочнения гель-волокон СВМПЭ.

Публикации

- Lebedev D.V., Marikhin V.A., Myasnikova L.P., Yakushev P.N., Ivankova E.M. Segmental mobility in polyethylene near-surface layers // J. Macromol. Sci. Part B-Phys., 2013, v.52, № 12, p. 1770-1783.
- Лебедев Д.В., Иванькова Е.М., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Радованова Е.И., Бойко Ю.М., Штильман М.В. Эволюция строения приповерхностных нанослоев сверхвысокомолекулярного полиэтилена в процессе ориентационной вытяжки // ФТТ, 2014, т.56, № 6, с. 1201-1206.
- Егоров В.М., Бойко Ю.М., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Радованова Е.И. Исследование сверхпрочных полимерных волокон калориметрическим методом // ФТТ, 2016, т. 58, № 8, с. 1568-1572.
- Boiko Yu.M., Marikhin V.A., Myasnikova L.P., Moskalyuk O.A., Radovanova E.I. Weibull statistics of tensile strength distribution of gel-cast ultra-oriented film threads of ultra-high-molecular-weight polyethylene // J. Mater. Sci. 2017. V. 52. № 3. P. 1727-1735.
- Байдакова М.В., Дороватовский П.В., Зубавичус Я.В., Иванькова Е.М., Иванчев С.С., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Яговкина М.А. Формирование и трансформация моноклинной и орторомбической фаз в реакторных порошках сверхвысокомолекулярного полиэтилена // ФТТ, 2018, т. 60, № 9, с. 1847-1951

ВЫСОКОТЕРМОСТОЙКИЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ СЕТОК

Базовое структурное подразделение – лаборатория Динамики материалов. Исследования ведутся в сотрудничестве с лабораторией Диагностики структур и материалов твердотельной электроники.

В связи с развитием новых областей техники проявляется повышенное внимание к полимерным материалам, предназначенным для работы в экстремальных, высокотемпературных условиях в авиации, космосе, микроэлектронике, в "горячих зонах" конструкций и др. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе проводятся систематические исследования структуры и свойств высокотермостойких наноструктурированных полимерных материалов нового поколения на основе гетероциклических сеток.

Известно благоприятное влияние присутствия гетероциклов в структуре полимеров на их термическую стабильность (линейные полиимиды, полибензимидазол). Наиболее перспективны в этом отношении нанокомпозиты на основе густосшитых гетероциклических полимерных сеток. В 2012-2018 г.г. в ФТИ впервые были выполнены комплексные физические исследования гибридных нанокомпозитов этого класса, синтезированных в Институте химии высокомолекулярных соединений НАН Украины. Исследовалась большая группа новых материалов, полученнных из -С≡N-содержащих соединений двух типов: дициановых эфиров бисфенолов (полицианураты, ПЦ или Суапаte Ester resins, CER) [1-3] и бисфталонитрилов



Рисунок 1. Формулы фрагмента ПЦ сетки с триазиновыми циклами (слева) и макроцикла фталоцианина в БФН сетке (справа).

(фталонитрильные полимеры, БФН, BAPhN) [4]. В матрицы вводились в количествах от 0.01 до 10 вес. % функционализированные кремнийсодержащие наночастицы – кремнекислородные полиэдры (ПОСС, POSS), силикатные нанослои монтмориллонита (MMT) или наноблоки SiO₂; последние "встраивали» в матрицу методом золь-гель технологии.

Спектроскопией в средней и далекой ИК области были исследованы молекулярная структура и динамика полимерных матриц. Электронная микроскопия (TEM, STEM) в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDXS) использовалась для анализа наноструктуры, элементного анализа нанообъемов, нанораспределения Si в композитах. Релаксационные и деформационные характеристики композитов при температурах от 20 до 600°С, температуры переходов исследовались методами динамического механического анализа (DMA), дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) и лазерно-интерферометрической спектрометрии по скоростям ползучести (CRS, метод разработан в лаборатории динамики материалов ФТИ [5]). Термическая и термоокислительная стабильность нанокомпозитов изучались методом термогравиметрического анализа (TGA).

В результате был обнаружен ряд новых эффектов, в том числе уникально высокая для полимеров


Рисунок 2. Длинноволновые ИК спектры отвержденного ПЦ (1) и БФН/амино-POSS (99.5/0.5 вес.%) нанокомпозита, отвержденного при 300°С (2) и пост-отвержденного до 430°С (3).

термическая стабильность некоторых из исследованных нанокомпозитов с БФН матрицей:

1. Спектроскопически показано сложное строение исследуемых гетероциклических матриц, особенно БФН матрицы. В ПЦ сетке основными являются триазиновые гетероциклы, а в БФН матрице превалируют макроциклы фталоцианина (Рис. 1 и 2). Подтверждены также ковалентное встраивание наночастиц в матрицу (гибридизация) и необходимость высокотемпературного пост-отверждения БФН композитов для достижения оптимума свойств.

2. Рентгеновские спектры и гистограммы нанораспределения Si (POSS или SiO2) в БФН и ПЦ матрицах обнаружили возможность квазирегулярного распределения наночастиц в аморфной матрице при отсутствии их кластеризации. При 0.1% SiO² гистограмма практически совпадает с Гауссовым контуром однородного распределения наночастиц в матрице. В то же время с ростом содержания кремнезема SiO₂ в композите и его кластеризацией наблюдаются их расхождение и даже резкое несоответствие вследствие структурной неоднородности (Рис. 3). 3. При введении в матрицы пачек ММТ наблюдались характерные изменения в степени их расщепления (эксфолиации), максимальной при ≤ 0.1 вес. % ММТ и уменьшающейся с ростом содержания этих наночастиц. На Рис. 4 показаны различные степени эксфолиации ММТ, включая получение отдельных слоев толщиной ~ 1 нм. Пики Si, Al, Mg в рентгеновских спектрах идентифицируют ММТ.

4. Показана взаимосвязь наноструктуры, молекулярной динамики и свойств исследованных композитов. Длинноволновые ИК спектры (Рис. 2) и динамический механический анализ (Рис. 5) обнаружили значительные эффекты торможения динамики



Рисунок 3. Гистограммы содержания *Si* (ат. %) в нанообъемах 1x1x100 нм³ ПЦ композитов с 0.1, 1 и 10 вес. *SiO₂*. *Получены по сотням EDX* спектров. Гауссовы контуры отвечают квазирегулярному распределению *SiO*₂ в матрице.



Рисунок 4. Электронно-микроскопические фото и рентгеновские спектры БФН нанокомпозитов с 0.1 и 1 вес. % ММТ (электронный пучок фокусирован на площадках диаметром 2 нм).

матрицы под влиянием наночастиц и резко выраженную динамическую гетерогенность в переходе стеклования БФН композитов. Температура стеклования Тg ПЦ нанокомпозитов достигала ~300°С, отвержденных БФН нанокомпозитов – около 380°С, а после пост-отверждения, в частности, путем нагревания до 430°С со скоростью 3°С/мин, Tg последних варьировалась в пределах от 460 до 570°С (Рис. 5).







Рисунок 6. Зависимость Tg от содержания SiO₂, по данным DSC (кружки) и DMA (крестики), для серии ПЦ-SiO₂ композитов.

динамику и свойства матрицы обнаружено при введении сверхмалых количеств неорганических блоков (вплоть до 0.02–0.1 вес. %, Рис. 6) [1-3]. При этом в случае "встраивания" SiO2 в полимерной сетке создавались только неорганические узлы субнаноразмера. В итоге были впервые получены полимерные субнанокомпозиты [3]. При этом наблюдалось превосходство свойств субнанокомпозитов над свойствами как чистой матрицы, так и нанокомпозитов, содержащих нанокластеры (графически иллюстрируется схемой на Рис. 7).

6. Обнаружен высококооперативный характер перехода стеклования в БФН нанокомпозитах, его аномальное поведение как "квазифазового" перехода: измерения релаксационных спектров при различных частотах дают значения его "кажущейся" энергии активации >10³ кДж/моль.

7. Сравнительный DMA БФН нанокомпозитов в средах воздуха и азота показал, что влияние среды проявляется, начиная с температур ~500°С, при "включении" процессов термоокислительной деструкции. Высокотемпературная обработка в среде азота приводила к полному подавлению перехода стеклования и неизменной величине динамического модуля



Рисунок 7. Графическое изображение данных об улучшении свойств ПЦ композитов при переходе от образцов с большими нанокластерами SiO₂ к образцам с малыми нанокластерами и к образцам с узлами SiO₂ субнаноразмера. Кластеры оценивались методом STEM и по картам нанораспределения Si в композитах методом EDXS.

нанокомпозита в диапазоне температур от 20 до 600°С (Рис. 8), что для полимеров наблюдалось впервые.

8. Обнаружена сравнительная термическая стабильность лучшего из БФН нанокомпозитов (с 2% MMT) до ~500°С в воздушной среде и до 900°С в среде азота с сохранением целостности материала, что необычно для полимеров и важно для некоторых применений. Показан рост термической стабильности при введении в матрицу наночастиц.

Лучшие из исследованных композитов перспективны для работы в качестве конструкционных и функциональных материалов в экстремальных температурных условиях.





Публикации

- Bershtein V.A., Fainleib A.M., Egorova L.M., Grigoryeva O.P., Kirilenko D.A., Konnikov S.G., Ryzhov V.A., Starostenko O.M., Yakushev P.N., Yagovkina M.A., Saiter J.-M. The impact of ultra-low amounts of introduced reactive POSS nanoparticles on structure, dynamics and properties of densely cross-linked Cyanate Ester resins. Europ. Polym. J. 2015. V. 67. P. 128-142.
- 2. Bershtein V.A., Fainleib A.M., Egorova L.M., Gusakova K.G., Grigoyeva O.P., Kirilenko D.A., Konnikov S.G., Ryzhov V.A., Yakushev P.N., Lavrenyuk N. The impact of ultra-low amounts of amino-MMT on dynamics and properties of densely cross-linked Cyanate Ester resins. Nanoscale Res. Lett. 2015. V. 10. P. 165-179.
- Bershtein V.A., Fainleib A.M., Gusakova K.G., Kirilenko D.A., Yakushev P.N., Egorova L.M., Lavrenyuk N., Ryzhov V.A. Silica subnanometer-sized nodes, nanoclusters and aggregates in Cyanate Ester resin-based networks: structure and properties of subnanoand nanocomposites. Europ. Polym J. 2016. V. 85. P. 375-389.
- Bershtein V.A., Kirilenko D.A., Markina D.I., Ryzhov V.A., Yakushev P.N., Fainleib A.M., Guskova K.G., Melnychuk O.G. Ultrahightemperature phthalonitrile nanocomposites with functionalized silicon-based nanoparticles: structure, dynamics, properties. Keynote speech at Polymer Congress. Thesis, P.19-20. London. June 2018.
- Bershtein V.A., Yakushev P.N. Laser-interferometric creep rate spectroscopy of polymers. Adv. Polym. Sci. 2010. V. 230. P. 73-219.



Рисунок 9. Термогравиметрические кривые потери массы чистой БФН матрицы (1) и БФН нанокомпозитов с 0.5 (2) и 2 вес. %ММТ (3, 4) в средах воздуха (1-3) и азота (4).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСЛОЕВ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Базовая лаборатория - лаборатория Физики прочности

Термолюминесценция - это свечение, возникающего при нагреве тела, предварительно облученного любым ионизующим излучением при низкой температуре. При взаимодействии высокоэнергетического излучения с веществом происходит его ионизация. Большая часть электронов после ионизации рекомбинирует с ионами, однако, часть электронов захватывается энергетическими состояниями (электронными ловушками), из которых рекомбинация с ионами запрещена правилами отбора. При нагреве за счет локальных флуктуаций тепловой энергии происходит высвобождение электронов из ловушек и их рекомбинация с ионами вещества, проходящая по излучательному механизму. Зависимость интенсивности испускаемого света от температуры, так называемая «кривая свечения» немонотонна и характеризуется наличием ряда пиков. Было установлено, что максимумы интенсивности, наблюдающиеся на кривой свечения, соотносятся с глубинами электронных ловушек, что позволило использовать термолюминесценцию в качестве инструмента по изучению природы и распределения ловушек по глубине в твердых телах. Электронные ловушки бывают химическим и физическими (рис.1).

В случае полимеров было найдено, что разгорание свечения совпадает по температуре с температурными интервалами определенных релаксационных переходов, характеризующихся размораживанием подвижности отдельных групп атомов (гамма-релаксация), размораживанием квазинезависимой подвижности молекулярных сегментов (бэта-релаксация) и размораживанием кооперативной подвижности молекулярных сегментов (альфа-релаксация). Было также установлено, что активационная энергия размораживания молекулярной подвижности близка по величине к глубине электронных ловушек, разрушаемых в области соответствующего релаксационного перехода.

Таким образом, анализ профилей и температурного положения пиков на кривой свечения дает возможность получить ценную информацию о релаксационных свойствах полимеров, количестве и типе ловушек, их глубине, энергии активации, необходимой для их разрушения, количестве дефектов, молекулярной динамике и взаимном расположении молекулярных сегментов. Кроме того, анализ спектров термолюминесценции позволяет оценить наличие и количество примесей в исследуемом материале, а также приводит к более глубокому пониманию механизмов взаимодействия излучения с веществом.

Обычно для возбуждения термолюминесценции используют глубоко проникающие высокоэнергетические излучения, (рентгеновские или гамма-лучи). Такую люминесценцию называют «радиотермолюминесценция» (РТЛ) При работе с проникающими излучениями невозможно выделить сигнал от поверхности. Поэтому, для исследования поверхности в конце 70-х годов прошлого века было предложено использовать







Рисунок 2. Кривые свечения ПИТЛ и РТЛ от реакторного порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), синтезированного при 30°С.

в качестве ионизирующего источника маломощную низкотемпературную плазму тлеющего разряда (НТП), возбуждающую только поверхностный слой исследуемого материала, при нагреве которого испускаются кванты света. В отличие от РТЛ такую люминесценцию называют «плазмоиндуцированной термолюминесценцией» (ПИТЛ).

В последнее десятилетие метод ПИТЛ активно используется для изучения специфики строения тончайших приповерхностных нанослоев полимеров, поскольку, как известно, свойства поверхности существенно отличаются от свойств объема и во многом определяют поведение материала в различных физических полях. Эти исследования стали возможны, благодаря созданному в лаборатории уникальному новому прибору Нанолюминографу, с помощью которого оказалось возможным при определенной величине приведенного напряжения в маломощной низкотемпературной плазме разряда в аргоне возбуждать люминесцентное свечение лишь в тончайших приповерхностных нанослоях толщиной не более 3-5 нм. Подробно работа прибора и преимущество метода плазмоиндуцированной термолюминесценции описаны в разделе «Научное и функциональное приборостроение».

При использовании Нанолюминографа были получены принципиально новые и очень важные результаты. Так, например, настоящий прорыв был сделан при изучении поверхностных свойств реакторных порошков (продуктов синтеза) сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), которые используются в безрастворном способе получения сверхпрочных высокомодульных нитей путем спекания частиц и последующего ориентационного упрочнении [1, 2]. Сравнительный анализ кривых свечения РТЛ и ПИТЛ (рис.3) показал, что в приповерхностных нанослоях сегментальная подвижность заторможена и размораживается при температуре на 60 К выше, чем в объеме частицы, что позволило сформулировать научно-обоснованные рекомендации, как для проведения синтеза, так и выбора сценария спекания.

Наличие напряжений в приповерхностных слоях насцентных частиц СВМПЭ было подтверждено микродифракционным рентгеновским анализом, проведенном на рентгеновском дифрактометре Xenocs (Франция), обнаружившим в приповерхностном слое частицы присутствие метастабильной моноклинной фазы, которая, как известно, существует только под напряжением. Этот феномен объяснили специфической кристаллизацией в условиях ограниченного пространства, когда растущая при синтезе цепь начинает кристаллизоваться, будучи еще одним концом прикрепленной к катализатору.

При кристаллизации СВМПЭ из покоящегося расплава молекулярная подвижность в приповерхностных нанослоях, как показали термолюминесцентные исследования, на 10 К выше, чем в объеме, что должно оказывать существенное влияние на протекание на поверхности химических реакций, и определять адгезионные, трибологические и другие физико-химические свойства материала [1, 3]. Удивительное явление было обнаружено при изучении скорости спада изотермической люминесценции от возбужденных плазмой аргона совместимых полимерных композиционных материалов. Оказалось, что при равном процентном содержании в композите аморфного полистирола (ПС) и поли (2,6 диметил 1,4 фенилен оксида (ПФО), в его приверхностном нанослое находится почти 100% ПФО. На основании ряда экспериментов с другими композициями пришли к выводу, что на поверхность всегда «выталкивается» полимер с меньшим коэффициентом поверхностного натяжения [4].

Это открытие имеет далеко идущие послёедствия для коммерческого использования композиционных полимерных материалов, благодаря которому можно уменьшать в матрице содержание дорогого полимера, который должен «работать» на поверхности.



Рисунок 3. скорость спада изотермической люминесценции от различных композиций ПП (PS) и ПФО (PPO)

Уникальные результаты были получены также при изучении приповерхностных нанослоев сверхвысокопрочных высокомодульных нитей, приготовленных методом гель- технологии из расплава СВМПЭ в разных растворителях. Было установлено, что молекулярная подвижность на поверхности пленочных нитей, полученных из раствора в декалине, меньше чем у нитей, при получении которых использовалось минеральное масло [5]. На основании наших исследований ранее было установлено, что главной причиной разрушения сверхпрочных нитей и волокон является образование полос сброса при изгибе. Чем жестче поверхностный слой, тем больше вероятность развития процесса сбросообразования. Поскольку эти нити в основном используются в композиционных бронезащитных материалах, то крайне важно знать, что гель-нити, полученные из раствора в декалине, лучше использовать в нетканых изделиях, а гель-нити, полученные из растворов в минеральном масле, можно подвергать изгибным деформациям, изготавливать буксировочные тросы, канаты и пр. с наименьшими потерями в прочности.

В настоящее время проводится большая работа по разработке плазмохимического метода нанесения специфического фтор-содержащего покрытия на колбы резонатора квантового водородного генератора (КВГ) частоты (Н-мазера), обеспечивающего лучшую добротность сигнала [6], от которой зависит продолжительность бесперебойной работы КВГ во время орбитальных полетов.

Наряду с этим с помощью метода термолюминесценции продолжается изучение материалов с изменяющейся фазой (phase change materials) [7], широко использующихся в современной технике для накопления и хранения энергии.

Результаты исследований последних лет с помощью метода термолюминесценции при использовании Нанолюминографа обобществлены в обзоре, опубликованном в США [8].

Публикации

 Д. В. Лебедев. Молекулярная подвижность в приповерхностных слоях полимеров// канд. диссертация. ФТИ им.А. Ф. Иоффе РАН, 2011

- D. V. Lebedev , V. A. Marikhin , L. P. Myasnikova , P. N. Yakushev, E. M. Ivankova "Segmental Mobility in Polyethylene Near- Surface Layers//Journal of Macromolecular Science, Part B. Physics. 2013, 52:12, 1770-1783
- Boiko,YM; Myasnikova,LP, On the nature of enhanced segmental mobility at entangled amorphous polymers interfaces, 2016, Colloid Polym. Sci., v.294, pp. 471-478
- Yuri M. Boiko, Dmitri V. Lebedev, Liubov' P. Myasnikova Surface segregation in blends of miscible amorphous polymers//Short Communication Colloid and Polymer Science 2013, V. 291, Issue 6, pp 1519-1523
- Д. В. Лебедев, Е. М. Иванькова, В. А. Марихин, Л. П. Мясникова, Е. И. Радованова, Ю. М. Бойко, М. В. Штильман. Эволюция строения приповерхностных нанослоев сверхвысокомолекулярного полиэтилена в процессе ориентационной вытяжки// Физика твердого тела, 2014, том 56, вып. 6
- 6. Мясникова Л.П., Беляев А.А. Иванькова Е.М., Власова Е.Н.,

Калачев А.А., Лебедев Д.В., Мясников А.Л. «Использование метода плазма-индуцированной термолюминесценции для сравнительного изучения фторсодержащих покрытий и их стабильности в экстремальных условиях» Метрология времени и пространства Ф.У. ВН. И. ТРИ, Менделеево, 2013, стр.370-373

- Л.П. Мясникова, Д.В. Лебедев, Е.М. Иванькова, В.А. Марихин, О.Ю. Соловьева, Е.И. Радованова. Определяющая роль полидисперсности в релаксационном спектре предельных углеводородов, выявленная с помощью метода плазмоиндуцированной термолюминесценции// Физика твердого тела, 2016, том 58, вып. 2
- L. P. Myansikova, Yu. M. Boiko, E. M. Ivan'kova, V. A. Marikhin, O. Yu. Solov'eva, E. I. Radovanova and A. A. Kalachev. Chapter1 Advances in Thermoluminescence Research/lin «Advances in Materials Science Research. Volume 20» Editors: Maryann C. Wythers New York U.A. Nova Science Publishers, 2015.

ПОВЕДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Базовое структурное подразделение – лаборатория Динамики материалов. Исследования ведутся в сотрудничестве с лабораторией Диагностики структур и материалов твердотельной электроники

Лаборатория динамики материалов была создана в ФТИ по инициативе А.Ф. Иоффе и Н.Н. Давиденкова в 1938 году. Основным направлением исследований лаборатории стало изучение деформирования и разрушения твердых тел при высоких скоростях нагружения. Во время Великой Отечественной войны лаборатория работала в Казани и внесла заметный вклад в усиление бронезащиты танков и устойчивости бензобаков самолетов к возгоранию. В те годы лабораторией руководили В.Л. Куприенко (1938–1942 гг.), И.В. Курчатов (1942–1943 гг.) и вызванный из армии Ф.Ф. Витман (1943–1967 гг.), благодаря которому и его многочисленным ученикам лаборатория стала одной из ведущих в стране по динамическим исследованиям материалов. В 50–60-е годы были исследованы металлы и сплавы в широком диапазоне скоростей нагружения (до 10 км/с). В дальнейшем круг исследуемых материалов непрерывно расширялся, были изучены стекла, полимеры, композиты, горные породы и керамики. Ниже приведены некоторые из последних разработок лаборатории.

Прозрачная броня

Как было показано в работах лаборатории динамики материалов, после химической полировки листового стекла его прочность может достигать 2÷3 ГПа. Проведенные опыты с упрочненным стеклом показали, что такое стекло может противостоять внедрению ударника с «мягким» стальным сердечником (рис.1, 2, 3).



Рисунок 1. Фотографии взаимодействия ударника из «мягкой» стали со стеклом. Скорость ударника 700 м/с.



Рисунок 2. Рентгенограммы взаимодействия пластичного ударника, движущегося со скоростью 700 м/с с двухслойной пластиной, включающей 3 мм стекла и 10 мм упрочненного стекла.



Рисунок 3. Ударник до и после взаимодействия с упрочненным стеклом

В свою очередь, при использовании в качестве лицевого слоя лейкосапфира толщиной 4–6 мм защита может противостоять ударнику с твердым сердечником (рис. 4).





Показано, что новые прозрачные защиты могут иметь в 2–3 раза лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с используемыми в настоящее время (ПАТЕНТ на изобретение №2359832 «Прозрачная керамическая композиция», ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 15.01.2008 – 15.01.2028). На практике это позволит существенно снизить вес и толщину окон легкобронированной техники (машин пехоты, вертолетов, катеров и т.п.).

Моделирование защиты космических аппаратов и планетарных объектов от осколков «техногенного мусора», возникающих при освоении космического пространства и планет Солнечной системы

Фрагменты техногенного мусора моделируются металлическими струями (2–9 км/с) с кинетической энергией до 10 кДж, формируемыми действием взрыва. С помощью контактных датчиков, оптической и рентгеновской съемки исследуется процесс внедрения высокоскоростной струи в различные материалы и их комбинации, включая стекла, керамики, металлы и сплошные грунты [1]. Результаты анализируются в сравнении с гидродинамическим приближением внедрения струи с учетом прочностного сопротивления взаимодействующих тел (рис. 5) и численного моделирования (рис. 6)



Рисунок 5. Методика исследования внедрения струи в стекло.

- 1 устройство получения высокоскоростной струи;
- 2 преграда из стекла.

Пространственно-временная диаграмма

- отображения результатов:
- о измеренные времена t внедрения струи на глубину L;
 моделирования траекторий формирования (кривая красного цвета) и сетки движения элементов струи (косые линии с обозначением скорости струи Vi);
- гидродинамическое моделирование внедрения элементов медной струи в стекло с учетом задержки радиальной реакции (сплошная кривая синего цвета) и без учета радиальной реакции (пунктирная кривая). Точками отображена траектория вторичного внедрения на схлопнувшемся материале каверны.

[2]. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа регистрируются структура и состав материалов после высокоскоростного взаимодействия.

Исследования взаимодействия металлических струй со скоростями 2–9 км/с с конденсированными средами показали, что наряду с гидродинамическим инерционным и прочностным сопротивлениями внедрению основным фактором, определяющим поглощение струи, является радиальная реакция среды на внедряющийся поток. Физические процессы,



Рисунок 6. Отображение результатов численного моделирования внедрения струи в керамику в моменты времени 1, 8, 15, 22 и 29 мкс (цветом выделены слои керамики) [2]. Наклонные прямые – траектории элементов струи с обозначением скорости движения в км/с.
1 – окончание гидродинамического внедрения; 2 – область диспергирования, смешивания элементов струи с каверной, преобразование кинетической энергии струи и рассеивание в радиальном направлении; 3 – накопление материалов взаимодействия на дне каверны.



Рисунок 7. Анализ сохраненных материалов взаимодействия струи и каверны. а - каверна от внедрения медной струи со скоростью 6 — 8 км/с в ультрафарфор (аналог планетного грунта). b – поверхность вспененной массы, заполняющей каверну в ультрафарфоре: спектры: 1 - зерна оксидов кремния и алюминия; 2 - частицы конденсации паров меди.

определяющие быстроту радиальной реакции, обеспечивают эффективность дестабилизации высокоскоростного внедрения.

Спонтанное развитие дестабилизации внедрения металлической струи в хрупких материалах (горных породах, керамиках и стеклах) инициируется радиальной реакцией в виде откольного характера схлопывания каверны. Радиальная реакция в хрупких материалах приводит к вторичному внедрению, усилению взаимодействия с каверной и к деградации проникающей способности струи. Кинетическая энергия струи расходуется на диспергирование, смешение, плавление и испарение материалов струи и каверны (рис. 7).

Для медной струи при скоростях более 6 км/с начинает проявляться радиальная реакция среды в виде расширения газо-жидкостной смеси взаимодействующих материалов при разгрузке зоны внедрения, которое обеспечивает последующее возмущение высокоскоростного потока (рис. 8).

Так, эффективность экранной защиты возрастает при выполнении экранов из алюминия, железа и меди в соответствии с возможностью испарения меди [3]. Исследования продолжаются для пористых и





Рисунок 8. Анализ последствия взаимодействия высокоскоростного потока с металлом: а - поверхность каверны в меди после внедрения медной струи, сфера – результат конденсации медных паров; b - численное моделирование прохождения медных экранов струей со скоростью 7.4 км/с.

энергонасыщенных материалов экранной защиты.

Применение высокоскоростных металлических струй позволяет моделировать защиту космических аппаратов и планетарных объектов от фрагментов техногенного мусора при освоении планет Солнечной системы.

Проведенные работы позволили установить связы поглощения струи с прочностными параметрами высокоплотных грунтов, определить подходы к конструктивным решениям, обеспечивающим радиальную реакцию при высокоскоростном взаимодействии.

Исследованы примеры организованной (конструктивной) радиальной реакции при внедрении струи в жидкости в ограниченном объеме, в пористые и энергонасыщенные композиции.

Публикации

- 1. B. V. Rumyantsev. Collective Penetration of Cumulative Jets into Brittle Materials. Technical Physics, Vol. 60, No. 4, pp. 614-617 (2015).
- 2. B. V. Rumyantsev, V. Yu. Klimenko. Mechanism of anomalous penetration of shaped charge jet into ceramics. «Shock Compression of Condensed Matter - 2011», AIP Conference Proceedings, Vol. 1426, No 1, pp. 56-59 (2012); https://doi.org/10.1063/1.3686220
- 3. B.V. Rumiantsev, A.I. Mikhaylin. Phase transition effect on efficiency of screen protection against elongated hyper-velocity projectiles. Acta Astronautica, Vol. 135, pp. 15-20 (2017).

НАНОУГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Базовое подразделение – лаборатория Физики кластерных структур, разработки ведутся также в лабораториях Физики аморфных полупроводников, Физики полупроводниковых приборов, Новых неорганических материалов и в сотрудничестве с лабораториями Диагностики материалов и структур твердотельной электроники, Микроволновой спектроскопии кристаллов, Спектроскопии твердого тела, Литий-ионной технологии

Технология углеродных наноструктур – новое научное направление, возникшее на рубеже веков и связанное с открытием новых аллотропных модификаций углерода – фуллеренов, нанотрубок, а затем графена. Сотрудники Института были инициаторами организации Российской программы «Фуллерены и атомные кластеры» (1994-2004 гг.), которая привела к формированию в стране признанных в мире научных групп исследователей «наноуглерода» (nanocarbons). Этому способствовала международная конференция, организуемая ФТИ им. А. Ф. Иоффе с 1993 года в Санкт-Петербурге, в которой принимают участие признанные мировые лидеры этого научного направления.

Неослабевающий интерес к углеродным наноструктурам, изображения которых стали эмблемой международных нанотехнологических конференций, определяется, с одной стороны, тем, что они представляют собой нуль-мерные (фуллерены), двумерные (графен) и одномерные (нанотрубки) углеродные объекты, в которых реализуются новые физические эффекты, с другой – возможностями создания на их основе новых элементов электроники и оптоэлектроники, композиционных материалов, систем преобразования и накопления энергии, а также биомаркеров, селективных адсорбентов и катализаторов.

В настоящее время тематика исследований Института в области «наноуглерода» охватывает следующие фундаментальные и прикладные направления:

Механизмы структурных фазовых переходов в

ряду наноалмаз - луковичная форма углерода - нанографит;

- Магнитные свойства наноалмазов и нанографита;
- Методы синтеза и функционализации поверхности графена и оксида графена;
- Термоэлектрические эффекты в углеродных наноструктурах;
- Теория электронного транспорта в кристаллах;
- Теплопроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур, в том числе синтезируемых при высоких давлениях и температурах.

Детонационные наноалмазы

Возможность изучать структурные фазовые превращения на наномасштабе стала побудительным мотивом для начала исследования детонационных наноалмазов (ДНА) в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в 1995 году. Как известно, промышленный синтез алмаза из графита при высоких давлениях и температурах (НРНТ синтез) начался с середины 50-ых годов прошлого века и в настоящее время в мире производится сотни тысяч карат таких НРНТ алмазов с размером от сотен до единиц микрон. Технология ДНА основана на синтезе алмаза из атомов углерода взрывчатого вещества и НРНТ условиях, возникающих в ударной волне. Короткое время взрыва определяет малый размер кристаллов ДНА – миллиардные доли метра. ДНА являются единственной углеродной наноструктурой, признанный в мире приоритет открытия которой принадлежит России.

В результате проведённых в Институте исследований была расшифрована структура отдельной частицы ДНА, определён состав химических групп на ее поверхности, разработана и реализована технология получения стабильных гидрозолей ДНА высокой степени очистки со средним размером алмазных частиц 4-5 нм, обладающих отрицательным и положительным электрокинетическим потенциалами. Разработанная технология. зашишенная несколькими российскими патентами, позволяет воспроизводимо получать стабильные гидрозоли ДНА из промышленных порошков различных производителей. Это стало основой для широкого спектра научных исследований, направленных на изучение уникальных свойств новых наноструктур, синтезируемых на основе ДНА. Указанные исследования проводятся в кооперации с российскими (ИОНХ РАН, Москва; ИПФ РАН Нижний Новгород; НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ Дубна) и зарубежными научными группами (Токийский технологический институт, университет Hosei, Япония; Университет им. Бен Гуриона, Израиль; Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, Франция).

Среди приоритетных результатов в области исследований ДНА последних лет следует отметить модель агломерата ДНА, лежащую в основе разработанной технологии получения стабильных гидрозолей, технологию модификации поверхности 4-5 нм алмазной наночастицы ионами металлов, обнаружение и объяснение фазового перехода золь-гель при малой концентрации (~5 вес.%) твердой фазы, обнаружение и объяснение эффекта ориентированного роста алмазных монокристаллов микронных размеров из наночастиц ДНА [1-4].

Нанографит и нанографен

Исследования парамагнетизма краевых тронных спиновых состояний в нанографитах / нанографенах, предсказанных в 1996 году японским ученым Фуджитой, развиваются в Институте в сотрудничестве с Tokyo Institute of Technology. Образцы нанографита изготавливаются из наноалмазов путем термообработки. В ходе этих исследований был экспериментально обнаружен низкотемпературный парамагнетизм краевых состояний (парамагнетизм Кюри) в сочетании с орбитальным диамагнетизмом и парамагнетизмом Паули. Исследование п-электронных состояний методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) с использованием молекул кислорода, как парамагнитных зондов, позволило обнаружить при низких температурах новую "магнитную единицу" со спином S=1, образованную ион-радикалом кислорода О2, связанным с краем нанографенового листа с энергией связи < 50 мэВ. Исследование этого объекта, возникающего при переносе заряда с края графена на молекулу кислорода, позволило понять распределение электронной плотности вблизи краев типа zig-zag и уникальную роль такого края, как "инжектора" электронов [5].

Впервые с использованием ЭПР при половинном магнитном поле были обнаружены "запрещенные" переходы в триплетных азот-вакансионных (NV-) оптических центрах в ДНА в концентрации 2.5 ppm. Эти центры обуславливают специфическую "красную" люминесценцию ДНА в спектральном диапазоне 600-850 нм, что позволяет использовать их в качестве флуоресцентных маркеров в биомедицинских приложениях. В алмазах, спеченных из ДНА в условиях больших давлений и температур, методом ЭПР обнаружены два типа парамагнитных центров: Р1 центры (изолированные примеси азота) и триплетные близко расположенные азотные пары со спином S=1. Последние демонстрировали уникальный сигнал со сверхтонкой структурой в области половинного магнитного поля. Анализ спектра азотных пар позволил определить параметры спин-гамильтониана такого составного триплетного центра [6].

Термоэлектрические эффекты в углеродных наноструктурах

Одним из новых направлений, развиваемых в лаборатории, является теоретическое и экспериментальное исследование термоэлектрических эффектов в углеродных наноструктурах. Развивая идеи Л.Э. Гуревича об увлечении электронов хаотическими фононами (1946 г.), теоретически рассмотрен эффект увлечения электронов баллистическими фононами и показано, что в случае углеродных наноструктур, содержащих *sp*³ (алмазоподобные) и *sp*² (графитоподобные) фазы, такой эффект должен приводить к существенному возрастанию термоэлектрического коэффициента. Также было показано, что увлечение электронов баллистическими фононами существенно влияет на процессы автоэлектронной эмиссии и определяет сопротивление Капицы в углеродных наноструктурах, в том числе в графене. Впервые было экспериментально показано, что величина коэффициента термоЭДС имеет ярко выраженный максимум при определенном соотношении *sp*²/*sp*³ фаз [7].

Графен

Развитие технологий получения графена и материалов на его основе – одно из важнейших направлений исследований. Особенность развиваемого в Институте подхода заключается в использовании химического метода расслаивания природного кристаллического графита, позволяющего избежать использования общепринятых дорогостоящих и малопродуктивных методов, основанных на кристаллизации углерода, выделяемого из твердой или газовой фазы. В результате химической обработки получены гидрозоли оксида графена – графеновых листов размерами до 150 мкм с присоединенными к поверхности гидроксильными и эпоксидными группами. Замещение воды в суспензиях листов оксида графена на органические растворители открыло пути получения разнообразных полимер-графеновых композитных материалов с заданной электропроводностью. Свободно подвешенные графеновые пленки одноатомной толщины, получаемые вакуумным восстановлением оксида графена, позволили создать мембраны для просвечивающей электронной микроскопии нанообъектов. Использование оксида графена, как промежуточного этапа при



Рисунок 1. Схема образования монокристалла алмаза из частиц ДНА

получении графена, позволило управлять структурой и химическим составом графеновых материалов и, в частности, получить листы перфорированного графена одноатомной толщины с отверстиями, края которых модифицированы карбоксильными группами [8, 9].

Теория электронного транспорта в массивах нанокристаллов

В сотрудничестве с университетом Миннесоты разработана теории электронного транспорта в массивах нанокристаллов. Показано, что концентрация примеси для перехода диэлектрик-металл оказывается существенно выше, чем рассчитанная, исходя из известного критерия Мотта [10].

Развитие НРНТ синтеза

В конце 90-ых годов в кооперации с сотрудниками завода «Ильич» были начаты исследования фазовых переходов при высоких давлениях в фуллеренах и изучение влияния фуллеренов на НРНТ синтез алмазов из графита. С 2004 года ведутся эксперименты по НРНТ синтезу алмазов и композитов на основе алмазов при давлениях (до 8 ГПа) и температурах (2000 °C). Имеющаяся экспериментальная техника позволила синтезировать проводящие алмазы, легированные бором (с концентрацией бора до 2·10²⁰ см-3) и изучать процессы кристаллизации и графитизации детонационных наноалмазов в присутствии различных каталитических добавок [11].

Впервые экспериментально показано, что использование в НРНТ процессе в качестве реакционной смеси ДНА вместе с предельными ациклическими углеводородами, одноосновными или многоосновными спиртами приводит к образованию монокристаллов алмазов с размерами до 15 µm. Спектр комбинационного рассеяния света свидетельствует о совершенстве кристаллической решетки алмаза. Предполагается, что формирование монокристаллов алмаза микронных размеров из частиц ДНА размером около 5 nm



Рисунок 2. Полученные композиты медь-алмаз виде теплоотводов с различным типоразмером.

происходит по механизму ориентированного присоединения (рис. 1).

Показано, что в монокристаллах алмаза, полученных таким способом, высокая концентрация люминесцентных азот-вакансионных центров достигается без традиционно используемого облучения высокоэнергетическими частицами.

В сотрудничестве с Санкт-Петербургским Государственным Технологическим институтом разработан метод создания алмаз-медных композитов с рекордным значением теплопроводности до 900 Вт/м·К (рис. 2) [12].

В сотрудничестве с Санкт-Петербургским Государственным Политехническим университетом Петра Великого методом горячего прессования изготовлен композитный материал, состоящий из углеродных нанотрубок (УНТ), нанесенных на поверхность частиц алюминия.

Экспериментально показана возможность получения композиционного материала УНТ-алюминий с плотностью 2,7 ± 0,05 г/см³, твердостью до 60 НВ и переменной теплопроводностью в интервале 45-150 Вт/(м*К) путем регулирования температуры горячего прессования. Подробная информация об исследованиях, проводимых в лаборатории Физики кластерных структур, приведена на сайте <u>http://www.ioffe.ru/nanocarbon</u>.

Литература:

- Dideikin,AT; Aleksenskii,AE; Baidakova,MV; Brunkov,PN; Brzhezinskaya,M; Davydov,VY; Levitskii,VS; Kidalov,SV; Kukushkina,YA; Kirilenko,DA; Shnitov,VV; Shvidchenko,AV; Senkovskiy,B; Shestakov,MS; Vul,AY. // Carbon, 2017, v.122 pp 737-745
- Vul,AY; Eidelman,ED; Aleksenskiy,AE; Shvidchenko,AV; Dideikin,AT; Yuferev,VS; Lebedev,VT; Kul`velis,YV; Avdeev,MV. // Carbon 2017, v.114 pp. 242-249.
- Gridnev,ID; Osipov,VY; Aleksenskii,AE; Vul,AY; Enoki,T. // Bull. Chem. Soc. Jpn., 2014 v.87, pp. 693-704
- Dideikin,AT; Eidelman,ED; Kidalov,SV; Kirilenko,DA; Meilakhs,AP; Shakhov,FM; Shvidchenko,AV; Sokolov,VV; Babunz,RA; Vul,AY. // Diam. Relat. Mat., 2016. v.75, pp. 85-90
- 5. Boukhvalov,DW; Osipov,VY; Shames,AI; Takai,K; Hayashi,T;

Enoki, T. // Carbon, 2016. v.107 pp. 800-810.

- Осипов,ВЮ; Шахов,ФМ; Ефимов,НН; Минин,ВВ; Кидалов,СВ; Вуль,АЯ. // ФТТ. 2017, Т.59, С.1125-1132
- Eidelman E.D., Meilakhs A.P., Semak B.V., Shakhov F.M. Journal of Physics D: Applied Physics.// 2017, v. 50 (46), 464007
- Kirilenko D.A., Dideykin A.T., Aleksenskiy A.E., Sitnikova A.A., Konnikov S.G., Vul' A.Ya. Micron. // (2015) v. 68, pp. 23–26.
- Rabchinskii M. K., Shnitov V.V., Dideikin A.T., Aleksenskii A.E., Vul' S.P., Baidakova M.V., Pronin I.I., Kirilenko D.A., Brunkov P.N., Weise J., Molodtsov S. L. J. Phys. Chem. C // 2017, v. 120, pp. 28261-28269.
- Chen T., Reich K. V., Kramer N.J., Fu H., Kortshagen U.R., Shklovskii B. I. Nature Materials.// 2016, v.15, pp. 299–303.
- Shakhov F.M., Abyzov A.M., Kidalov S.V., Krasilin A.A., Lähderanta E., Lebedev V.T., Shamshur D.V., Takai K. J. Phys. Chem. Solids // 2017, v. 103 pp. 224–237.
- 12. Abyzov A.M., Kidalov S.V., Shakhov F.M. Appl. Therm. Eng.// 2012. v. 48 pp. 72-80.

ГРАФЕН НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ: ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Базовое структурное подразделение – лаборатория Физики полупроводниковых приборов, в сотрудничестве с лабораториями Спектроскопии твердого тела и Оптики поверхности

Графен (один монослой графита) в настоящее время является предметом обширных исследований, обусловленных его уникальными физическими свойствами и огромным потенциалом для создания устройств нового поколения. Для того чтобы быть экономически выгодными для многочисленных приложений, требуются большеразмерные пластины высококачественного однородного графена. Сублимация кремния из полуизолирующей монокристаллической подложки карбида кремния (SiC) является одним из наиболее перспективных способов эпитаксиального роста графена. Такая технология роста дает возможность выращивать графен на поверхности коммерческих подложек SiC диаметром до 6 дюймов, промышленный выпуск которых освоен в настоящее время. Подобные структуры могут быть использованы в стандартной технологической линейке для изготовления полупроводниковых приборов.

В рамках работ по созданию в ФТИ технологии роста графена, перспективного для создания приборных

устройств, решались две задачи. Первая из них была направлена на разработку технологии роста



Рисунок 1. Технологический комплекс для роста графена в инертной атмосфере.

высококачественного монослойного графена с характеристиками на уровне лучших мировых образцов. Вторая задача была тесно связана с первой и была направлена на создание прототипов приборов с использованием выращиваемого графена.

Получение и свойства

Был создан современный ростовой комплекс (рис. 1), позволяющий проводить эпитаксиальный рост графеновых пленок методом термического разложения Si-грани поверхности политипа 4H-SiC при температурах, превышающих 1800°C в среде инертного газа (аргона).

Такая технология роста позволяет более точно контролировать процесс сублимации компонентов SiC, в результате чего становится возможным контролировать как толщину графена, так и однородность покрытия образца пленкой графена с высокой точностью.

Морфологические, структурные, химические и электронные характеристики, а также транспортные свойства выращиваемого графена контролировались с использованием большого комплекса аналитических



Рисунок 2. Массив спектров КРС образца, выращенного на Si-грани 4H-SiC (a). Распределение поверхностного потенциала (b).



Рисунок 3. Картина дифракции медленных электронов. Энергия электронов 90 эВ (а). Обзорный спектр РФЭС при энергии фотонов 650 эВ (б).

методик. Ниже приводятся результаты, которые являются типичными для образцов, выращенных на конечном этапе оптимизации технологических параметров.

На рис. 2а представлен массив спектров комбинационного рассеяния света (КРС), измеренный в диапазоне 1300–2800 см⁻¹ на площади образца размером 12.5×12.5 мкм².

В спектрах наблюдаются особенности, характерные для рассеяния света на графеновой пленке: линии *G*, *2D* и слабая линия *D*. Анализ карт и гистограмм распределения интенсивностей, ширин линий, а также отношений их интенсивностей приводит к заключению о том, что образец в анализируемой области представляет собой преимущественно монослойный графен с небольшим количеством (не более 10%) двуслойных включений.

На изображении распределения поверхностного потенциала (рис. 2b) присутствуют светлые пятна в виде вытянутых полос, направление которых совпадает с направлением террас на изображении топографии. Площадь светлых пятен не превышает 10% от площади изображения. Было установлено, что разность потенциалов между светлыми и темными пятнами составляет ~140 мВ. Такое значение соответствует разности поверхностных потенциалов между одно- и двухслойным графеном. При этом светлые области на рис. 2b следует отнести к двухслойному графену. Это заключение согласуется с результатами КРС-исследований, полученными на той же самой площади образца.

Данные дифракции медленных электронов (ДМЭ), которые изображены на рис. За, демонстрируют характерную для образца графен / SiC(0001) структуру (6√3×6√3)R30°, четкие рефлексы которой свидетельствуют о строгой пространственной ориентации кристаллической решетки графена. Для определения химического состава приповерхностной области пленок использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). На рис. 3b приведен обзорный спектр РФЭС после удаления адсорбированных на воздухе молекул путем прогрева в сверхвысоком вакууме при температуре 500°С. Кроме линий углерода и кремния, в спектре РФЭС было обнаружено лишь небольшое количество кислорода. Его концентрация в верхних атомных слоях SiC составила примерно 1 ат.%.

Детальный анализ формы спектров РФЭС в области линии C1s дает возможность оценить среднюю толщину графена. Для надежного определения толщины графена проводился анализ спектров РФЭС,



Рисунок 4. Спектры РФЭС, измеренные в области C1s при различных энергиях фотонов (а). Результаты моделирования интенсивности отдельных спектральных компонент (б).

полученных при трех энергиях фотонов, обеспечивающих различную глубину анализа в диапазоне 5–23 Å. Такие измерения были проведены на оборудовании Российско-Германского канала вывода синхротронного излучения накопительного кольца BESSY II (г. Берлин). Толщину слоев определяли путем подбора значений толщины графена и буферного слоя, обеспечивающих наилучшее совпадение рассчитанных и измеренных интенсивностей отдельных компонент спектров C1s. Результаты приведены на рис. 4, где показаны относительные интенсивности для оптимальных значений толщины: 4.5 Å для буферного слоя и 5.7 Å для графена. Это соответствует количеству *sp*²-слоев углерода 1.5 и 1.7 для буферного слоя и графена соответственно.

Известно, что в зависимости от числа слоев графена изменяется электронная структура валентной зоны. Для однослойного графена характерен дираковский конус электронных состояний в точке *К* зоны Бриллюэна, тогда как формирование второго слоя приводит к энергетическому расщеплению конуса. Данные фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) по электронной структуре валентной зоны системы графен/SiC(0001), полученные с использованием излучения He II (40.8 эВ), выявили в точке *К* нерасщепленный дираковский конус (рис. 5а).

Это свидетельствует о том, что на поверхности доминирует однослойное графеновое покрытие. Слабая особенность при 0.27 эВ указывает на наличие двухслойных областей. Этот вывод согласуется с данными КРС и АСМ, согласно которым образуется однослойный графен с небольшим количеством (~ 10%) включений двухслойных островков с субмикрометровыми размерами. Однако толщина графена, определяемая XPS, выше, чем значения, полученные другими методами, вероятно, из-за упругого рассеяния



a)

Рисунок 5. Структура электронной валентной зоны в окрестности точки К зоны Бриллюэна (а). Ближняя тонкая структура рентгеновских спектров поглощения (NEXAFS). Над спектрами указан угол между нормалью к поверхности образца и вектором линейной поляризации фотонов (b).

фотоэлектронов, которым мы пренебрегали в нашем анализе. Из данных ФЭСУР также следует, что точка Дирака находится ниже уровня Ферми и имеет энергию связи *E*≈0.4 эВ. Это однозначно указывает на *n*-тип допирования с концентрацией электронов в зоне проводимости *n*≈10¹³ см⁻².

На рис. 5b представлены данные спектроскопии рентгеновского поглощения вблизи К-края углерода (NEXAFS), записанные в режиме частичного квантового выхода. Характерной особенностью спектров поглощения графеноподобных структур является наличие π- и σ-резонансов, имеющих противоположные угловые зависимости. Максимальная интенсивность σ-резонанса ожидается, когда вектор поляризации излучения лежит в плоскости графена (угол 0°). При этом интенсивность π-резонанса должна стремиться



a)

Рисунок 6. Чип газового сенсора: темная область соответствует графену, светлые - омическим контактам (а). График отклика сенсора на основе графена в зависимости от концентации. NO, в газовой смеси при температуре 20°C (б). к нулю. Такая зависимость наблюдается на рис. 5*b* и свидетельствует о том, что графен и буферный слой являются планарными *sp*² структурами, ориентированными параллельно поверхности SiC.

В целом образцы, выращенные в среде аргона на Si-грани SiC на конечном этапе оптимизации технологических параметров, можно характеризовать как высококачественный монослойный графен с небольшим количеством включений двухслойных островков с субмикронными размерами.

Транспортные свойства выращенных пленок имеют характеристики, присущие лучшим мировым образцам, изготовленным таким методом. Это открыло возможность использования созданной технологии для производства прототипов приборов.

Газовые и биосенсоры на основе графена

Сочетание высокой подвижности носителей заряда с максимально возможным отношением площади поверхности к объёму приводит к тому, что адсорбция минимального количества примеси на поверхность графена может заметно изменить его общую проводимость. Таким образом, графен является весьма перспективным материалом для изготовления сенсорных устройств.

За последние несколько лет интерес к мониторингу воздушных загрязнителей значительно вырос. Окись азота (NO) и диоксид азота (NO₂) являются вредными загрязнителями воздуха, которые оказывают агрессивное воздействие на почву, растения, животных и здоровье человека. Традиционные датчики NO, работают в относительно высоком диапазоне концентраций 0.1-100 частей на миллион (ppm), чего недостаточно для экологического мониторинга. На основе полученных пленок графена был изготовлен прототип газового сенсора с чувствительностью к концентрации молекул NO, на уровне не хуже 2-5 ppb (две-пять частиц на миллиард). Такая чувствительность сенсора вполне достаточна для мониторинга окружающей среды. Важными преимуществами разработанного датчика являются его низкая стоимость, низкой уровень потребляемой мощности, а также то, что изменение влажности атмосферы оказывает слабое влияние на измерение концентрации NO₂.

Были выполнены работы по изготовлению и тестированию биосенсора на основе графена для регистрации белковых молекул. Проблема селективности датчика была решена путем использования реакции антиген-антитело. Компоненты этой пары могут взаимодействовать только друг с другом, но не с каким-либо



Рисунок 7. Изменение сопротивления сенсора на основе графена во время его контакта с растворами, содержащими свободный флуоресцин (с указанными концентрациями) (а). Изменение сопротивления сенсора на основе графена во время контакта с растворами, содержащими конъюгат F-BSA-5 (b)

Материаловедение и наноматериалы

другим белком. Как известно, определенные стадии многих заболеваний включают появление маркеров антигена, которые являются специфическими для одного или группы нескольких заболеваний. Эти антигены могут связываться с определенными антителами, предварительно иммобилизованными на поверхности датчика графена. Затем реакция антиген-антитело по аналогии с газовым сенсором приведет к изменению удельного сопротивления пленки графена.

Для проверки работоспособности биосенсора в качестве низкомолекулярного лиганда был выбран флуоресцеин, молекулярная масса которого (0.332 kDa) соответствует размерам ряда биологически значимых маркерных молекул, таких как гормоны, нуклеотиды и некоторые короткие пептиды. Была обнаружена чувствительность датчика к концентрации флуоресцеина на уровне 1-10 нг/мл. Тесты с лигандами высокой молекулярной массой проводили с использованием специально подготовленного бычьего сывороточного альбумина (BSA), конъюгированного с флуоресцином (F-BSA-5). Молекулярная масса конъюгата F-BSA-5 (69 kDa) сопоставима с молекулярной массой белков, используемых в качестве маркеров заболеваний человека. Была обнаружена чувствительность датчика к концентрации F-BSA-5 на уровне 1-5 нг/мл, что указывает на перспективность созданного сенсора для ранней диагностики различных заболеваний. Таким образом, использование пары антиген-антитело позволяет

решить проблему селективности биосенсора и открывает очень широкие возможности для использования датчиков на основе графена в медицине и биологии. Этот подход может привести к созданию портативных биосенсоров, способных в режиме экспресс-анализа выявлять в биологических жидкостях диагностически значимые маркеры заболеваний, которые в настоящее время детектируются только с помощью трудоемкой и продолжительной процедуры иммуноферментного анализа.

Литература:

- Н. В. Агринская, В. А. Березовец, В. И. Козуб, И. С. Котоусова, А. А. Лебедев, С. П. Лебедев, А. А. Ситникова, Структура и транспортные свойства наноуглеродных пленок, полученных сублимацией на поверхности на 6H-SiC. // ФТП. 2013. Т. 47, С. 301-306.
- А. А. Лебедев, С. П. Лебедев, С. Н. Новиков, В. Ю. Давыдов, А. Н. Смирнов, Д. П. Литвин, Ю. Н. Макаров. Сверхчувствительный газовый сенсор на основе графена. // ЖТФ. 2016. Т. 86, Вып. 3, С. 135-139.
- В.Ю. Давыдов, Д.Ю. Усачев, С.П. Лебедев, А. Н. Смирнов, В. С. Левицкий, И.А. Елисеев, П.А. Алексеев, М.С. Дунаевский, О.Ю. Вилков, А.Г. Рыбкин, А.А. Лебедев. Исследование кристаллической и электронной структуры графеновых пленок, выращенных на 6H-SiC (0001). // ФТП. 2017. Т. 51, Вып. 8, С. 1116-1124.
- S. Novikov, N. Lebedeva, A. Satrapinski, J. Walden, V. Davydov, A. Lebedev. Graphene-based sensor for environmental monitoring of NO₂. // Sens. Actuators B: Chem. 2016. Vol. 236, P. 1054.

МЕТАМАТЕРИАЛЫ И ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

В 1987 году Э. Яблонович [1] и С. Джон [2] заложили основы нового направления в физике твердого тела – создание и исследование «полупроводников» для света – структур с периодом решетки, сопоставимым с длиной электромагнитной волны. Эти структуры получили название «фотонные кристаллы». При этом следует отметить, что первую одномерную периодическую структуру, т.е. говоря современным языком – одномерный фотонный кристалл – теоретически исследовал лорд Рэлей еще в 1887 году [3]. Подобные идеи также высказывались В.П. Быковым в 1972 году [4], однако эти работы опередили свое время и не вызвали должного научного резонанса.

В начале этого столетия Д. Пендри в серии работ ввел в рассмотрение еще один класс искусственных структур, которые получили название метаматериалы. В отличие от фотонных кристаллов, распространение света в метаматериалах может быть описано традиционным способом при помощи материальных параметров – диэлектрической проницаемости µ и магнитной восприимчивости ε . На основе метаматериалов можно сконструировать левосторонние среды, предложенные В.Г. Веселаго в середине XX-го века [5].

В 1994 г. в отделе оптики твёрдого тела ФТИ им. А. Ф. Иоффе (рук. академик А. А. Каплянский) была создана группа, приступившая к работе по проблематике фотонных кристаллов, и уже в 1995г. совместно с лабораторией Физики анизотропных материалов были выполнены пионерские исследования, демонстрирующие широкие возможности использования синтетических опалов в качестве трехмерных фотонных кристаллов. В дальнейшем исследования, в том числе совместные, по фотонным кристаллам и метаматериалам успешно проводились во многих лабораториях ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Литература:

- 1. E. Yablonovitch, Inhibited Spontaneous Emission in Solid State Physics and Electronics. Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).
- 2. S. John, Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. Phys. Rev. Lett. 58, 2486 (1987).
- Strutt, JW (Lord Rayleigh). On the Maintenance of Vibrations by Forces of Double Frequency, and on the Propagation of Waves Through a Medium Endowed with a Periodic Structure. Phil. Mag., S.5, vol.24, no.147, pp.145-159 (1887).
- 4. В.П. Быков, Спонтанное излучение в периодической структуре. ЖЭТФ, 62, 505-513 (1972).
- 5. В.Г. Веселаго, Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями *є* и *µ*. УФН, 92, 517- 526 (1967).

ОПАЛЫ – ТРЕХМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

Базовое подразделение – лаборатория Спектроскопии твёрдого тела

Экспериментальные и теоретические исследования фотонных кристаллов (ФК) являются одним из приоритетных направлений исследований в лаборатории Спектроскопии твердого тела ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Началу этих исследований положила работа [1], в которой впервые рассмотрены синтетические опалы как 3D ФК для видимого спектрального диапазона (рис.1). В дальнейшем работы по изучению фотонных свойств прямых и инвертированных опалоподобных ФК были развернуты в десятках ведущих научных центров по всему миру.

Натуральные (природные) и синтетические опалы сформированы из частиц а-SiO₂ (Рис.2а). Природные опалы состоят из отдельных разориентированых фотонно-кристаллических доменов, при этом частицы а-SiO₂, образующие различные домены, могут отличаться по размеру. Такая неоднородность структуры является причиной удивительно красивой игры света в опалах – опалесценции (Рис.2b). В отличие от натуральных опалов, в синтетических опалах, используемых в качестве ФК, ценится однородность структуры, которая определяет монохромную окраску образца [2]. Диаметр частиц в различных образцах может варьироваться в пределах 200–800 nm.

Все оптические исследования ФК на основе синтетических опалов проводились на ориентированных образцах высокого качества [3-6]. В серии публикаций была определена фотонная зонная структура синтетических опалов, т.е. зависимость энергии и ширины фотонной запрещённой зоны (ФЗЗ) от волнового вектора для всей поверхности зоны Бриллюэна (рис.3) [3,4]. Было проведено исследование спектров пропускания опалов в зависимости от ориентации светового пучка относительно гранецентрированной кубической (ГЦК) решетки опалов, поляризации света, контраста диэлектрической проницаемости опал-заполнитель и толщины образцов. Измерения выполнены в условиях низкого диэлектрического контраста опал-заполни-



Рисунок 1. (а) Спектры пропускания и отражения синтетических опалов при нормальном падении. (b) Спектры пропускания, измеренные при наклонном падении при углах 5°, 15° и 30° [1].

тель для основных высокосимметричных направлений двойникованной ГЦК решетки опалов. Экспериментально определенная зависимость энергетического положения фотонных зон от направления волнового вектора света хорошо описывается расчетной дисперсионной зависимостью брэгговских длин волн при дифракции света на системе плоскостей (hkl) ГЦК-решетки.

Для изучения оптической дифракции света на образцах синтетических опалов была разработана уникальная экспериментальная методика, а также развита теория, описывающая брэгговскую дифракцию Лауэ на тонких опаловых пленках и дифракцию Брэгга на объемных кристаллах. Чтобы однозначно интерпретировать экспериментальные результаты, был предложен оригинальный метод представления



Рисунок 2. (a) SEM – изображение упорядоченной структуры синтетического опала [2]. (b) Фотографии образцов природных опалов.

дифракционных картин: в декартовых координатах на осях отложены угол падения света на образец θ и угол регистрации дифрагированного света оси х и у на рис.4), а результаты представлены в виде цветного изображения, полученного из совокупности большого количества фотографий цилиндрического экрана. Отметим, что в случае 2D дифракции наблюдается сложная зависимость $\Theta = f(\theta)$. В то же время 3D брэгговская дифракция сводится к зеркальному отражению пучка от систем плоскостей и описывается простым линейным соотношением $\Theta = 2(\theta - \theta_{hkl})$, где θ_{hkl} – угол между нормалями к системам плоскостей (111) и (hkl). Поэтому в координатах (θ , Θ) разрешенные брэгговские рефлексы будут представлены в виде параллельных



Рисунок 3. Зона Бриллюэна ГЦК решетки опала и три ее сечения (a-d). (е) Фотонная зонная структура синтетического опала. Непрерывные кривые – расчет, значки, относящиеся к разным (hkl) стоп-зонам и обозначенные на вставке (f) – эксперимент. Рисунок из обзорной статьи [6].

прямых линий, что дает возможность однозначно разделить режимы 2D и 3D дифракции. На рис.4 представлены результаты исследования двумерной дифракции на тонкой пленке опала.

Следует также отметить еще один интересный результат: в спектрах пропускания опалов обнаружен резонанс Фано между брэгговской полосой («узкая линия») и фоновым рассеянием Ми («широкая полоса»), в результате которого форма узкой линии претерпевает качественные изменения: полоса «переворачивается», превращаясь из полосы отражения в полосу пропускания. Как следствие, происходит трансформация стоп-зоны в зону пропускания [5,6].

Литература:

 V. N. Astratov, V. N. Bogomolov, A.A. Kaplyanskii, A. V. Prokofiev, L.A. Samoilovich, S. M. Samoilovich, Yu.A. Vlasov, Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: quantum confinement and photonic band gap effects. Nuovo Cimento D 17, 1349 (1995).



Рисунок 4. (a) Развертка картины дифракции белого света на пленке опала (шесть слоев частиц a-SiO₂ диаметром 720 nm), зарегистрированной на цилиндрическом экране при нормальном падении светового пучка θ = 0. (b) Общая экспериментальная картина дифракции света, представленная в системе координат (θ, Θ) при изменении угла падения -90°< θ < 90°. (c) Расчет картин 2D дифракции численным методом в борновском приближении теории рассеяния. (d) Расчет положения 2D дифракционных рефлексов нулевого, первого и второго порядков из уравнений Лауэ для трех длин волн λ = 415, 500, 585 nm. [6].

- Yu.A. Vlasov, X.-Z. Bo, J. C. Sturm, and D. J. Norris, On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals. Nature 414, 289 (2001).
- A. V. Baryshev, A. A. Kaplyanskii, V. A. Kosobukin, K. B. Samusev,
 D. E. Usvyat, and M. F. Limonov. Photonic band-gap structure: from spectroscopy towards visualization. Phys. Rev. B, 70, 113104 1-4 (2004).
- A. V. Baryshev, A. B. Khanikaev, M. Inoue, P. B. Lim, A. V. Sel'kin, G. Yushin, and M. F. Limonov. Resonant behavior and selective switching of stop bands in three-dimensional photonic crystals with inhomogeneous components. Phys. Rev. Letters, 99, 063906 (2007).
- M. V. Rybin, A. B. Khanikaev, M. Inoue, K. B. Samusev, M. J. Steel, G. Yushin, and M. F. Limonov. Fano resonance between Mie and Bragg scattering in photonic crystals. Phys. Rev. Letters, 103, 023901 (2009).
- A.A. Kaplyanskii, A. V. Baryshev, M. V. Rybin, A. V. Sel'kin, M. F. Limonov. Optical properties of low contrast opal-based photonic crystals. p. 249-274 in: M. F. Limonov, R. M. De La Rue (Ed.) "Optical properties of photonic structures: interplay of order and disorder" C. C. Press (2012).

УПРАВЛЯЕМЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Базовое подразделение – лаборатория Физики аморфных полупроводников

Тематика фотонных кристаллов получила оригинальное развитие в серии технологических и экспериментальных работ, выполненных в лаборатории Физики аморфных полупроводников. Была продемонстрирована возможность эффективного управления световыми потоками в высококонтрастных трехмерных ФК на основе композитов опал-наполнитель на разных масштабах времен (вплоть до фемтосекундного). Управление достигается за счет изменения положения и ширины фотонной запрещённой зоны (ФЗЗ) при приложении различных внешних воздействий, изменяющих диэлектрическую проницаемость композитных ФК.

Перечислим кратко основные результаты работ по тематике управляемых трехмерных композитных фотонных кристаллов:

1. Для получения управляемых опалоподобных высококонтрастных трехмерных композитных ФК разработаны технологические основы синтеза, учитывающие размеры, форму, свойства поверхности пор опаловой матрицы, физико-химические свойства вводимых веществ, особенности массопереноса реагентов и продуктов, термодинамику и кинетику реакций в порах опала. Синтезирован набор композитов опал / полупроводник (Si, GaN, GaP, VO2, GaNxP1-x, GaN:Er, ZnS:Mn, AgI) и опал / металл (Au, Ag, Pt, Cu, W, Sn, Pb, In, Ga, Bi). Разработана методика инвертирования – селективного удаления опаловой матрицы, не изменяющая химический состав и кристаллическую структуру внедренного в поры функционального материала (т.е. получение целевого материала с топологией инвертированного опала).

2. Реализована концепция эффективного управления световыми потоками в трехмерных ФК на основе опаловых пленок и высококонтрастных ФК на основе композитов опал-наполнитель под влиянием различных внешних воздействий.



Рисунок 1. Спектрально-угловые зависимости интенсивности оптического отклика гибридных структур опал / GST225 с разной толщиной слоя халькогенидной пленки. БП-полоса брэгговского отражения, ВП-пик аномалии Вуда.



Рисунок 2. Фотоиндуцированное фемтосекундное переключение светового потока в трехмерном фотонном кристалле на основе композита опал/Si. Интенсивность накачки ~ 50 Дж/м², А_{чаевика} = 800 нм, А_{чаеи} = 770 нм.

Продемонстрирована перестройка ФЗЗ за счет изменения диэлектрической проницаемости трехмерного ФК на основе композита опал-Fe₂O₃. Наблюдаемый эффект обусловлен термодинамически контролируемыми химическими превращениями оксидов железа (α-Fe₂O₃→Fe₃O₄→α-Fe₂O₃) [1].

 При исследовании трехмерных ФК на основе композитов опал-VO₂, наблюдались рекордные сдвиги ФЗЗ (до 170 мэВ в спектральной области 1.5 мкм

 Теlecom Standard) в результате индуцированного тепловым нагревом фазового перехода полупроводник-металл в VO₂.

 Методом заполнения пор опаловой матрицы из расплава под высоким давлением получен композит опал/Agl и показано, что электрические, оптические и фотонно-кристаллические свойства композита управляются супер-ионным фазовым переходом в Agl.

– Реализована концепция управляемых фотонно-кристаллических гибридных структур, в которых управляемым элементом является материал с фазовой памятью, халькогенидное соединение Ge₂Sb₂Te₅ (GST225), обладающее обратимым фазовым переходом аморфное-кристаллическое состояние. Исследован оптический отклик, синтезированных гибридных



Рисунок 3. Фотоиндуцированное фемтосекундное переключение светового потока в трехмерном фотонном кристалле на основе композита опал/VO₂

структур опал/GST225, и продемонстрирована определяющая роль в его формировании дифракционных аномалий (аномалий Вуда), возникающих вследствие резонансной связи между падающим светом и квазиволноводными модами, возбуждающимися в поверхностном слое гибридной структуры [2-4].

 В трехмерных ФК опал/Si продемонстрировано сверхбыстрое (~30 фс) управление световым потоком, проявляющееся в уменьшении интенсивности брэгговского отражения (R) на величину до 50% [5].

– В композите опал/VO₂ достигнут рекордный по величине (~30 мэВ) обратимый сдвиг ФЗЗ при времени переключения (~500 фс), обусловленный сверхбыстрым фотоиндуцированным фазовым переходом полупроводник-металл в VO₂, приводящим к сильному изменению реальной части диэлектрической проницаемости ФК.

 – Гиперзвуковая модуляция спектрального положения ФЗЗ с помощью импульсов деформации, приводящих к изменению периода решетки в ФК на основе пленок синтетического опала, продемонстрирована



Рисунок 4. Когерентная акустооптическая модуляция в опаловых пленках.

в экспериментах, использующих методику сверхбыстрой пьезоспектроскопии [6].

Выполненные исследования доказывают, что опал обладает одновременно как фотонной зонной структурой, так и фононной зонной структурой в гиперзвуковой области частот, т.е., по сути, является фотонно-фононным кристаллом [7]. В таких материалах возможно эффективно управлять потоками фононов и селективно подавлять электрон-фононное взаимодействие, что, в свою очередь, приведет к существенному увеличению интенсивности излучения в непрямозонных полупроводниках, снижению порога лазерной генерации.

Литература:

- S.A. Grudinkin, S.F. Kaplan, N.F. Kartenko, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. Opal-hematite and opal-magnetite films: lateral infiltration, thermodynamically driven synthesis, photonic crystal properties. J. Phys. Chem. C, 112, 17855 (2008).
- A. B. Pevtsov, A. N. Poddubny, S.A. Yakovlev, D.A. Kurdyukov, V. G. Golubev. Light control in Ge2Sb2Te5-coated opaline photonic crystal mediated by interplay of Wood anomalies and 3D Bragg diffraction. J. Appl. Phys., 113, 144311 (2013).
- M.M. Voronov, A.B. Pevtsov, S.A. Yakovlev, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. Diffraction anomalies in hybrid structures based on chalcogenide-coated opal photonic crystals. Phys. Rev. B, 89, 045302 (2014).
- S. A. Dyakov, N. A. Gippius, M. M. Voronov, S. A. Yakovlev, A. B. Pevtsov, I. A. Akimov,
- S. G. Tikhodeev. Quasiguided modes of opaline photonic crystals covered by Ge2Sb2Te5. Phys. Rev. B96, 045426 (2017).
- A. V. Akimov, Y.Tanaka, A. B. Pevtsov, S. F. Kaplan, V. G. Golubev, S.Tamura, D. R. Yakovlev, M.Bayer. Hypersonic modulation of light in three-dimensional photonic and phononic bandgap materials. Phys.Rev.Lett., 101, 033902 (2008).
- A. S. Salasyuk, A. V. Scherbakov, D. R. Yakovlev, A. V. Akimov, A. A. Kaplyanskii, S. F. Kaplan, S. A. Grudinkin, A. V. Nashchekin, A. B. Pevtsov, V. G. Golubev, T.Berstermann, C.Brüggem, M.Bombeck, M.Bayer. Filtering of elastic waves by opalbased hypersonic crystal. Nano Lett., 10, 1319 (2010).

КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ Композиты на их основе

Базовое подразделение – лаборатория Мощных полупроводниковых приборов

Важное место среди исследований Института в области фотонно-кристаллических структур занимает изучение структур, представляющих собой упорядоченные решетки глубоких щелей или макропор с вертикальными стенками в монокристаллическом кремнии. Полученные с помощью фотолитографии и анизотропного травления (химического и электрохимического) щелевой (рис. 1а) и макропористый кремний (рис. 2), имеют период, соизмеримый с длиной световой волны, высокий контраст показателя преломления и представляют собой, соответственно, одно- (1D) и двумерный (2D) фотонный кристалл (ФК) для ИК света, распространяющегося в плоскости образца. Заполнение щелей и пор нелинейным оптическим материалом, таким как жидкий кристалл (ЖК), позволило получить композитные ФК с перестраиваемым спектральным положением фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Важнейшим достоинством полученных устройств является их совместимость с технологией кремниевых интегральных схем.

Совместно с сотрудниками Тринити колледжа (Ирландия, Дублин) и Института общей физики РАН (Москва) экспериментально и теоретически были изучены оптические свойства полученных структур. Впервые было предложено изготавливать 1D ФК с помощью анизотропного химического травления пластин с кристаллографической ориентацией (110) и продемонстрировано, что на оптическом спектре щелевого кремния имеются ФЗЗ (рис.1b). Аналогичные 1D ФК были изготовлены на Si (100), с помощью фотоэлектрохимического травления (рис. 3). [1-3].

Была разработана технология формирования полосок макропористого кремния с малым числом периодов (рис. 4а).



Рисунок 1. Щелевой кремний, полученный с помощью химического травления: a) SEM изображение, b) экспериментальный и расчетный спектры отражения и пропускания для 1D ФК на основе щелевого кремния с периодом 3 мкм.



Рисунок 2. Макропористый кремний, полученный с помощью фотоэлектрохимического травления



Рисунок 3. 1D ФК с периодом a=7 мкм, полученный с помощью фотоэлектрохимического травления (а). Экспериментальные (толстая) и расчетные (тонкая) спектры отражения и пропускания для структуры с 4 периодами (b).





Рисунок 4. Полоска 2D ФК и ее оптические характеристики: а) схема измерений, b) расчетные и экспериментальные спектры отражения, c) кремниевый слой на краю структуры толщиной w, определяющий появление поверхностного состояния.



Рисунок 5. Микрорезонаторы с брэговскими зеркалами из 2D фотонного кристалла и линейным дефектом в виде щели: а) и b) до заполнения жидким кристаллом, с) после заполнения. (а) - SEM изображение; b) и c) - изображения в оптическом микроскопе).

Проведены теоретические и экспериментальные исследования оптических свойств полученных 2D ФК структур в среднем ИК диапазоне спектра. Проанализированы факторы, влияющие на оптические характеристики реальных структур на основе макропористого кремния. Установлено, что низкодобротные провалы на спектрах отражения полоски 2D ФК являются поверхностными состояниями типа Тамма (рис. 4b) [4]. Их спектральное положение в ФЗЗ обусловлено



Рисунок 6. Электрооптический эффект в композитном 1D ФК: а) схема поперечного сечения структуры, b) SEM изображение периодической структуры со встречно штыревыми электродами, c) сдвиг края Ф33 при приложении напряжения (эксперимент и расчет).

толщиной кремниевого слоя (предслоя) w на границе ФК (рис. 4c). Определены условия получения полосок 2D ФК, при которых поверхностные состояния отсутствуют. Теоретически и экспериментально показано, что спектры отражения полоски 2D ФК с несимметричными границами содержат поверхностную моду созданную только входным предслоем [5].

Предложена конструкция и изготовлена структура композитного микрорезонатора на основе щелевого дефекта встроенного в полоску 2D ФК и заполняемого жидким кристаллом (рис. 5) [6, 7].

Предложена структура управляемого 1D ФК со встречно-штыревыми электродами на подложке «кремний на изоляторе», заполненного нематическим жидким кристаллом и показано, что изменение показателя преломления ЖК с помощью внешнего электрического поля позволяет перестраивать спектральное положение ФЗЗ (рис.6).

Литература

 Astrova E. V., Fedulova (Li) G. V. Formation of deep periodic trenches in photo-electrochemical etching of n-type silicon. J. Micromech. Microeng. V.19, p.095009(11) (2009).

- Astrova E. V., Tolmachev V. A., Fedulova (Li) G. V., Melnikov V. A., Ankudinov A. V., Perova T. S. Optical properties of onedimensional photonic crystals fabricated by photo-electrochemical etching of silicon. Appl. Phys. A. V. 98 (3), p. 571-581 (2010).
- Astrova E.V., Tolmachev V.A., Zharova Yu.A, Fedulova G.V., Baldycheva A.V., Perova T.S. Silicon periodic structures and their liquid crystal composites. Solid State Phenom., V.156-158, p. 547-554 (2009)
- Dyakov S. A., Baldycheva A. V., Perova T. S., Li G. V., Astrova E. V., Gippius N. A., Tikhodeev S. G. Surface states in the optical spectra of two-dimensional photonic crystals with various surface terminations. Phys. Rev. B. V. 86 (11), p. 115126 (2012).
- Li G. V., Astrova E. V., Dyakov S. A., Baldycheva A., Perova T. S., Tikhodeev S. G., Gippius N. A. Surface Tamm states in a photonic crystal slab with asymmetric termination. Phys. Stat. Sol. R. L. V. 7 (7), p. 481–484 (2013).
- Astrova E. V., Fedulova (Li) G. V., Zharova Yu. A. Defect engineering in 2D photonic crystals fabricated by electrochemical etching of silicon. Sol. St. Phenom. V. 178-179. p. 459-464 (2011).
- Li G. V., Astrova E.V., Zharova Yu.A., Dyakov S. A., Baldycheva A.V., Perova T. S., Gippius N. A., Tikhodeev S. G. Tunable microcavity based on macroporous silicon: feasibility of fabrication. Journal of Lightwave Technology. V. 31 (16), p. 2694-2700 (2013).

МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЛАЗМОННЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ

Базовое подразделение – лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур

Металл-полупроводниковые нанокомпозиты, содержащие металлические наночастицы внутри полупроводниковой матрицы, являются перспективными материалами для плазмоники – быстроразвивающейся области прикладной физики и нанотехнологии. Плазмоника предлагает новую концепцию манипуляции светом за счет использования локальных электромагнитных полей, связанных с плазмонными резонансами в проводящих слоях и частицах. Многогранность плазмоники проявляется в разнообразных приложениях от повышения эффективности светоизлучающих приборов до создания метаструктур с уникальными характеристиками.

Данный цикл исследований был инициирован развитием в лаборатории в конце прошлого века технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) АЗ-нитридных соединений, что позволило, в частности, получить качественные слои бинарных и тройных соединений в системе (In,Ga)N. В ходе исследования таких образцов были определены фундаментальные свойства InN, включая ширину запрещенной зоны. Это яркое открытие привело к пересмотру физики соединений нитридов металлов 3-й группы и инициировало широкомасштабные исследования, направленные на использование этих соединений в электронике и нанофотонике. Однако проведение изысканий в этом направлении осложнялось метастабильностью и нестехиометричностью соединений на основе (In,Ga) N и, более того, самопроизвольной преципитацией металлического индия. Фактом, во многом объяснившим противоречивые свойства соединений (In,Ga)N, было обнаружение плазмонных резонансов в металлических наночастицах. Систематические исследования плазмонных эффектов в таких средах привели к созданию концепции металл-полупроводниковых нанокомпозитов.

В ходе проведенных исследований было показано, что свойства подобных композитных сред радикально отличаются от свойств исходного полупроводника. Локализованные плазмоны (резонансы Ми) оказывают влияние на все основные оптические процессы в композитных структурах – излучение, поглощение, генерацию носителей светом, меняя уникальным способом их характерные энергии [1, 2]. Размещение металлических наночастиц внутри оптически активной полупроводниковой матрицы обеспечивает эффективное взаимодействие плазмонных резонансов с излучательными дипольными переходами. При этом возможно как усиление, так и подавление излучения в зависимости от размера металлических частиц. Модельные эксперименты, необходимые для окончательного доказательства концепции, были проведены с использованием метода ближнепольной оптической спектроскопии и измерений фотолюминесценции с временным разрешением [3, 4]. Они продемонстрировали усиление интенсивности излучения одиночных локализованных экситонов и ускорение скорости рекомбинации (эффект Парселла) при приближении металлических плазмонных частиц к излучающим диполям. Экспериментальные исследования были подкреплены теоретическими расчетами дипольных и мультипольных плазмонных резонансов, возбуждаемых в металлических частицах разного состава, в зависимости от их формы, расположения относительно вектора электрического поля и диэлектрического окружения [5]. Было обнаружено и описано явление терагерцового излучения при радиационном затухании плазмон-поляритонов, возбуждаемых в приповерхностных аккумуляционных слоях полупроводников [6]. На основе анализа термодинамики роста методом МПЭ систематизированы данные по основным характеристикам метастабильных АЗ-нитридных соединений [7]. Выполненные исследования плазмонных эффектов способствовали формированию нового направления – физики плазмонных металл-полупроводниковых нанокомпозитов [8].

Основные научные результаты были получены по трем направлениям, обуславливающим применение различных исследовательских методик.

Плазмонное усиление поглощения и люминесценции в металл-полупроводниковых нанокомпозитах

Оптические свойства нанокомпозитов были исследованы на примере InN с кластерами In, как спонтанно образуемыми, так и намеренно сформированными. В спектрах термически детектируемого оптического поглощения (ТДОП) таких структур были впервые зарегистрированы резонансы Ми, приводящие к дополнительным оптическим потерям и усилению люминесценции (Рис. 1). Обнаружено локальное усиление (до ~10²) инфракрасного излучения (0.7-0.8 эВ) в местах скопления кластеров In за счет возникновения связанных состояний плазмон – излучающий диполь. Найдено, что интенсивность излучения в слоях со специально сформированными вставками металлического In может быть на порядок выше, чем в слоях без них.



Рисунок 1. (а) Спектр ТДОП (сплошная линия) и фотолюминесценции (пунктир), измеренные в нанокомпозитной структуре InN/ In. Пик в спектре поглощения обусловлен плазмонным резонансом. (b) Совмещенные изображения, полученные с помощью СЭМ и микро-катодолюминесценции. Металлические наночастицы и поры в материале видны, соответственно, как светлые и темные пятна. Цветные пятна, окружающие их, показывают интенсивное инфракрасное излучение. (c) Усредненные спектры усиления в нанокомпозите InN/In, рассчитанные при изменении фактора формы наночастиц δ от 2 до 20.





Исследование кинетики спонтанной рекомбинации путем измерения фотолюминесценции с временным разрешением с последующим моделированием позволило определить фактор Парселла в нанокомпозитах. Его величина ~30 соответствует ускорению времени рекомбинации до 20 пс в металлических частицах. Однако наличие металлических частиц не всегда приводит к повышению интенсивности люминесценции. Усиление излучения реализуется около больших кластеров или их скоплений, тогда как диссипативное затухание плазмонов, способствующее усилению поглощения, наблюдается, если частицы имеют размер менее 5-10 нм. Это накладывает ограничение на способ формирования плазмонных систем.

Специфическое свойство плазмонных нанокомпозитов - различие характерных энергий оптических процессов, обычно хорошо совпадающих в полупроводнике. К примеру, обнаруженное различие краев ТДОП и фототока определяется тем, что ТДОП фиксирует повышение температуры образца, вызванное двумя причинами: межзонным поглощением в матрице и диссипативным распадом плазмонов в металлических кластерах, в том числе и ниже края поглощения полупроводника. Генерация же носителей заряда при возбуждении светом возникает только в области межзонного поглощения в полупроводниковой матрице.

Эффекты взаимодействия отдельных локализованных экситонов в твердых растворах InGaN и локализованного поверхностного плазмона в металлической наночастице

Впервые было экспериментально реализовано увеличение скорости спонтанной рекомбинации одиночных локализованных экситонов в пленке твердого раствора (In Ga, N при 0.2<x<0.5) в результате ближнепольного взаимодействия с плазмоном, локализованным в металлической (Au) наночастице [3]. Для контролируемого размещения плазмонной частицы вблизи поверхности InGaN использовалась система низкотемпературного ближнепольного оптического микроскопа с зондами, изготовленными из утонченного стеклянного волокна с золотой частицей, закрепленной на конце. Найдено, что необходимым условием достижения существенного усиления является шероховатость пленки на шкале длин, сравнимых с размерами плазмонной частицы, поскольку только помещение плазмоной частицы в углублении рельефа позволяет реализовать поляризационную конфигурацию, необходимую для наблюдения эффекта. Другое важное условие - резонанс энергий экситона и плазмона, достигалось вариацией содержания In в InGaN при формировании пленки методом МПЭ. Показано, что при соблюдении всех необходимых условий локальное взаимодействие с плазмоном приводит к многократному (до 60 раз при 300 К) усилению квантового выхода излучения небольшого числа экситонов, оказавшихся в ближнем оптическом поле частицы (Рис. 2). Тщательное позиционирование плазмонной частицы позволяло выделить и усилить излучение отдельных экситонов с низкотемпературной спектральной шириной линии 1-2 мэВ. Электродинамические расчеты, проведенные в рамках квазиклассической модели, показали, что наблюдаемое усиление определяется эффектом Парселла при резонансным взаимодействии квадрупольной и октупольной плазмонных мод в сферической наночастице с экситонным дипольным излучателем.

Терагерцовая электролюминесценция поверхностных плазмон-поляритонов в наноструктурированных слоях вырожденных полупроводников

Эффекты, сопутствующие возникновению плазмонных мод в полупроводниковых структурах, обусловили возникновение "терагерцовой плазмоники", имеющей большое значение для квантово-каскадных лазеров и других излучателей. Характерные частоты поверхностных плазмонов в легированных вырожденных полупроводниках оказываются в ТГц диапазоне, т.е. существенно ниже края поглощения. Потери на распространение плазмонов на интерфейсе между полупроводником и воздухом снижены, что обеспечивает возможность поддержания устойчивых плазмон-поляритонных мод в слоях, имеющих малую толщину. Для ряда In-содержащих полупроводников (InN, InAs, InSb), характерно наличие приповерхностного слоя, аккумулирующего электроны с концентрацией порядка 10¹⁹см⁻³, толщина которого (<10 нм) достаточно мала

для поддержания плазмон-поляритонных мод. Исследование ТГц излучения из слоев вырожденных полупроводников при электрической накачке показало, что оно связанно с поверхностными плазмон-поляритонами, при этом заполнение плазмонных состояний осуществлялось термически [6]. Поверхностные плазмоны не могут излучать непосредственно, поскольку их волновой вектор всегда больше волнового вектора света. Вывод излучения предполагает изменение волнового вектора, которое реализуется посредством случайной решетки, формируемой морфологическими дефектами. В спектрах ТГц электролюминесценции зачастую присутствовали пики излучения, связанные с рассеянием мод более высокого порядка. Моделирование сложной формы спектров оказалось возможным при учете дисперсии поверхностных плазмонов и структурного фактора нерегулярной решетки, который был определен посредством преобразования Фурье изображений поверхности, полученных сканирующей электронной микроскопией. Разработана модель, объясняющая характер мощностных зависимостей излучения. Показано, что сверхлинейный рост мощности излучения при больших мощностях накачки обеспечивает превосходство плазмон-поляритонного механизма в структурах на основе вырожденных полупроводников относительно ряда других систем.

В заключение, можно отметить, что полученные результаты имеют большое значение для проектирования нанофотонных систем на основе металл-полупроводниковых нанокомпозитов. В частности, они определяют границы применимости слоев InGaN для формирования различных нанофотонных и оптоэлектронных устройств.

Литература:

- Т. В. Шубина, С. В. Иванов, А. А. Торопов, П. С. Копьев, Плазмонные эффекты в наноструктурах на основе In(Ga)N, УФН 179, 1007 (2009).
- T. V. Shubina, V.A. Kosobukin, T.A. Komissarova, V.N. Jmerik, A. N. Semenov, B.Ya. Meltser, P.S. °Kop'ev, S. V. Ivanov, A.

Vasson, J. Leymarie, N.A. Gippius, T. Araki, T. Akagi, and Y. Nanishi, Inconsistency of basic optical processes in plasmonic nanocomposites, Phys. Rev. B. 79, 153105 (2009).

- A.A. Toropov, T. V. Shubina, V. N. Jmerik, S. V. Ivanov, Y. Ogawa, and F. Minami, Optically Enhanced Emission of Localized Excitons in InxGa1-xN Films by Coupling to Plasmons in a Gold Nanoparticle, Phys. Rev. Lett. 103, 037403 (2009).
- T. V. Shubina, A.A. Toropov, V.N. Jmerik, D. I. Kuritsyn, L. V. Gavrilenko, Z.F. Krasil'nik, T. Araki, Y. Nanishi, B. Gil, A. O. Govorov, S. V. Ivanov, Plasmon-induced Purcell effect in I.N. In metal-semiconductor nanocomposites, Phys. Rev. B 82, 073304 (2010).
- A.A. Toropov, T.V. Shubina, K.G. Belyaev, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, Y. Ogawa, and F. Minami, Enhancement of excitonic emission in

semiconductor heterostructures due to resonant coupling to multipole plasmon modes in a gold particle, Phys. Rev. B 84, 085323 (2011).

- T. V. Shubina, N.A. Gippius, V.A. Shalygin, A. V. Andrianov, and S. V. Ivanov, Terahertz radiation due to random grating coupled surface plasmon polaritons, Phys. Rev. B 83, 165312 (2011).
- S. V. Ivanov, T. V. Shubina, T.A. Komissarova,
 V. N. Jmerik, Metastable nature of InN and In-rich I. G. N alloys, J. Crystal Growth 403, 83-89 (2014).
- Alexey A. Toropov and Tatiana V. Shubina, "Plasmonic Effects in Metal-Semiconductor Nanostructures" in Series on Semiconductor Science and Technology, O. F. RD. U. IV. R. ITY. P. ESS, ISBN: 978-0-19-969931-5, NY, 2015. 369 pp.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ И МЕТАМАТЕРИАЛАХ

Базовые подразделения – лаборатория Спектроскопии твёрдого тела и сектор Теории квантовых когерентных явлений в твердом теле

«We live in a world of resonances» - так начинается обзор, опубликованный в Nature Photonics в 2017 г. [1], и действительно, практически все современные научные и бытовые устройства основаны на резонансных явлениях, многие из которых ярко проявляются в спектрах электромагнитных колебаний. Изучению резонансных явлений в фотонике посвящен цикл технологических, экспериментальных и теоретических работ, выполненных в 2010-2017 г. в лаборатории Спектроскопии твердого тела и секторе теории квантовых когерентных явлений в твердом теле. Тематика исследований менялась от изучения фотонных кристаллов и метаматериалов к исследованию топологических эффектов, РТ-симметрии и связанных электромагнитных состояний в континууме.

Ниже приведены ключевые результаты данного цикла работ.

 В фотонике наблюдается целый ряд ярких спектроскопических явлений, в том числе резонанс Фано, эффекты Керкера и Боррманна, наведенная прозрачность, расщепление Раби, эффект Аутлера-Таунса,







Рисунок 2. Фазовая диаграмма «фотонный кристалл метаматериал» в осях г/а (радиус цилиндра, нормированный на постоянную квадратной решетки) и ε (диэлектрическая проницаемость цилиндра). Горизонтальные линии дают представление о том, какое вещество может обладать свойствами метаматериала (в некотором спектральном диапазоне) [2].

РТ-симметрия. Эти эффекты объединяет фазовая диаграмма (рис.1), которая позволяет определить области их существования и корректно интерпретировать экспериментальные данные. Диаграмма построена на основе двухосцилляторной модели, в рамках которой удалось описать основные спектроскопические проявления резонансных эффектов в фотонике.

II. Введены в рассмотрение, исследованы экспериментально и теоретически фотонные фазовые переходы и соответствующие им фазовые диаграммы — новое направление в физике твердого тела [2, 3]. Фотонные фазовые переходы определяются взаимодействием резонансов Ми и Брэгга и приводят к возникновению новых физических свойств исследуемого объекта, например, к появлению отрицательной магнитной восприимчивости в чисто диэлектрической структуре при переходе от фотонного кристалла к метаматериалу. На рис.2 приведена фазовая диаграмма «фотонный кристалл - метаматериал», построенная для двумерной структуры, состоящей из однородных диэлектрических цилиндров, образующих в базисе квадратную решетку. III. Впервые установлено, что классическое резонансное рассеяние Ми на диэлектрических объектах представляет собой не что иное, как каскады резонансов Фано. Интенсивность контура Фано обращается в ноль на определенной длине волны, что приводит к невидимости диэлектрического объекта для стороннего наблюдателя (рис.3). Этот теоретический результат был подтвержден экспериментально в микроволновом диапазоне [4].

IV. Введено понятие «сверхрезонансных» мод (supercavity regime) [5], как альтернатива связанным состояниям в континууме (bound states in the continuum, BICs), которые могут существовать лишь в бесконечных структурах. Такие состояния, обладающие высокими значениями Q-фактора, были обнаружены в простейшей диэлектрической структуре – однородном цилиндре (рис. 4) [6]. Сверхрезонансные моды связаны с тройным резонансом Фано. Первый резонанс Фано



Рисунок 3. Рассеяние электромагнитной волны на однородном диэлектрическом цилиндре в области резонанса Ми, который описывается контуром Фано. В верхнем и нижнем ряду приведены расчетные изображения поперечной компоненты Нz электромагнитного поля на различных частотах, x=rw/c [1]. Видно, что на частоте x=0.504 цилиндр не возмущает падающую электромагнитную волну, оставляя цилиндр невидимым для стороннего наблюдателя.


Рисунок 4. (a) Спектры рассеяния электромагнитной волны на однородном диэлектрическом цилиндре в области антипересечения резонансных мод ТЕ020 и ТЕ012, обладающих контуром Фано. (b) Частоты мод в области антипересечения. (c) Параметр Фано q. (d) Добротности резонансов Q [6]

возникает из-за интерференции Ми-мод цилиндра с фоновой компонентой, второй резонанс Фано возникает из-за интерференции Фабри-Перо мод конечного цилиндра с фоновой компонентой. В свою очередь эти два резонанса взаимодействуют в областях антипересечения, что приводит к появлению нетипичного резонанса Фано в шкале нормированной длины цилиндра I/r. Именно в этой области появляется сверхрезонансная мода.

V. Развита теория резонансного фёрстеровского переноса энергии между экситонами в квантовых точках и вблизи плазмонных наноструктур [7]. Установлено, что коллективные эффекты могут влиять на скорость переноса и приводить как к ее подавлению, так и к ослаблению. Построена теория резонансного мандельштам-бриллюэновского рассеяния экситонных поляритонов в полупроводниковых сверхрешётках, позволяющая количественно описывать экспериментальные спектры рассеяния [8]. Сопоставление с экспериментом позволило определить энергии, скорости излучательного и безызлучательного затухания экситонных поляритонов. Предсказано и экспериментально обнаружено резонансное усиление до 10⁵ раз константы фотоупругого взаимодействия в GaAs сверхрешетках по сравнению с объемным GaAs. Построена теория генерации пар запутанных фотонов в наноструктурах в процессе спонтанного параметрического рассеяния, учитывающая омические потери и дисперсию. Предсказано усиление скорости генерации вблизи частоты топологического перехода между эллиптическим и гиперболическим режимом в метаматериалах из-за достижения условия широкополосного фазового синхронизма [9].

VI. Впервые резонанс Фано наблюдался в спектрах неупорядоченных объектов на примере 1D структуры, состоящей из последовательности слоев А и В. Ранее считалось, что в силу интерференционной природы резонанс Фано может наблюдаться только в спектрах упорядоченных объектов. В 1D структуре резонанс Фано проявляется при введении беспорядка по диэлектрической проницаемости в слоях В. При увеличении параметра, характеризующего разброс є,



Рисунок 5. (а) Спектры пропускания упорядоченного 1D фотонного кристалла в зависимости от числа элементарных ячеек AB. С ростом числа ячеек образуется широкая брэгговская зона отражения (стоп-зона). (b) Спектры пропускания неупорядоченной 1D фотонной структуры с беспорядком по диэлектрической проницаемости в слоях В в зависимости от числа элементарных ячеек AB. С ростом числа ячеек образуется узкая брэгговская зона пропускания

брэгговские полосы отражения сначала приобретаю ассиметричную форму, которая описывается формулой Фано, а затем происходит полный переворот полосы, т.е. обращение брэгговской полосы отражения в брэгговскую полосу пропускания (рис.5).

VII. На метаповерхностях различной симметрии наблюдались яркие дифракционные картины (Рис.6). Картины дифракции имеют тонкую структуру, благодаря которой можно определять не только симметрию образца, но и число структурных субмикронных элементов, формирующих двумерную решетку [10].

Литература:

- M. F. Limonov, M. V. Rybin, A. N. Poddubny, Y. S. Kivshar. Fano resonances in photonics. Nature Photonics, 11, 543- 554 (2017).
- M. V. Rybin, D. S. Filonov, K. B. Samusev, P.A. Belov, Yu.S. Kivshar, and M. F. Limonov. Phase diagram for the transition from photonic crystals to dielectric metamaterials. Nature Communications, 6, 10102 (2015).
- M. V. Rybin, K. B. Samusev, S. Yu. Lukashenko, Y. S. Kivshar, M. F. Limonov. Transition from two-dimensional photonic crystals to dielectric metasurfaces in the optical diffraction



Рисунок 6. Фотография экспериментальной установки и картина оптической дифракции Лауэ от образца с симметрией Сбv. Образец представляет собой набор параллельных полосок, образующих 2D-структуру с периодом решетки 1.0 мкм.

with a fine structure. Sci. Rep. 6, 30773 (2016).

- M. V. Rybin, D. S. Filonov, P.A. Belov, Yu.S. Kivshar, and M.F. Limonov. Switching from visibility to invisibility via Fano resonances: theory and experiment. Sci. Rep. 5, 8774 (2015).
- M. V. Rybin, Y. S. Kivshar. Supercavity lasing. Nature, 541, 164-165 (2017).
- M. V. Rybin, K. L. Koshelev, Z. F. Sadrieva, K. B. Samusev, A. A. Bogdanov, M. F. Limonov, Y. S. Kivshar. High-Q supercavity modes in subwavelength dielectric resonators. Phys. Rev. Letters, 119, 243901 (2017).
- A. N. Poddubny, Collective Förster energy transfer modified by a planar metallic mirror, Phys. Rev. B 92, 155418 (2015)
- B.Jusserand, A. N. Poddubny, A. V. Poshakinskiy, A. Fainstein, A. Lemaitre, Polariton resonances for ultrastrong coupling cavity optomechanics in GaAs/AIAs multiple quantum wells, Phys. Rev. Lett 115, 267402 (2015).
- A. N. Poddubny, I. V. Iorsh, A. A. Sukhorukov. Generation of Photon-Plasmon Quantum States in Nonlinear Hyperbolic Metamaterials. Phys. Rev. Lett., 117, 123901 (2016).
- M. V. Rybin, K. B. Samusev, S. Yu. Lukashenko, Y. S. Kivshar, M. F. Limonov. Transition from two-dimensional photonic crystals to dielectric metasurfaces in the optical diffraction with a fine structure. Sci. Rep. 6, 30773 (2016).

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

Базовое подразделение – лаборатория Интегральной оптики на гетеростурктурах

В лаборатории продемонстрирована возможность создания компактного перестраиваемого источника лазерного излучения в видимой части спектрального диапазона от красного до синего цвета за счет удвоения частоты (генерации второй гармоники, ГВГ) излучения инфракрасных полупроводниковых лазеров в волноводных периодически поляризованных нелинейных кристаллах. Большая ширина спектральной перестройки таких полупроводниковых лазеров достигается благодаря сверхширокому спектру усиления, получаемому за счёт применения в качестве активной области квантовых точек с варьируемым составом и размером [1]. Выполнение условий квазисинхронизма для эффективного удвоения частоты в нелинейном кристалле обеспечивается за счёт присутствия в волноводе мод высших порядков, как для длины волны накачки, так и для второй гармоники, что позволяет сохранять условия фазового квазисинхронизма в широком спектральном диапазоне. Такие компактные полноцветные когерентные источники лазерного излучения будут чрезвычайно важны для самого широкого диапазона современного использования - от биомедицины до проекционного лазерного телевидения.

Проведенные исследования показали, что добиться истинного синхронизма фаз при ГВГ в широком диапазоне длин волн позволяет использование метаматериала (одномерного фотонного кристалла), состоящего из чередующихся слоев собственного полупроводника и полупроводника, легированного до металлической проводимости, что обеспечивает подавление материальной дисперсии показателя преломления [2]. Результат расчета собственных мод системы из бесконечного числа чередующихся слоев нитрида алюминия собственной и металлической проводимости показал, что соответствующим выбором толщин слоев и угла распространения волны основной гармоники, можно добиться эффективной синхронизации фаз основной волны гармоники и волны второй гармоники и обеспечить длину когерентности порядка нескольких сантиметров, что на несколько порядков выше значений, определяемых дисперсией показателя преломления, характерной для полупроводниковых материалов и нелинейных кристаллов (в частности, ниобата лития и калий-титанил-фосфата). На основе метаматериала было предложено устройство для эффективной ГВГ, обладающее свойствами волновода [3], схематичное изображение которого представлено на рис. 1.



Рисунок 1. Схематическое изображение структуры фотонно-кристаллического волновода с подавленной дисперсией показателя преломления.

Результат расчета дисперсии света в волноводе с фотоннокристаллической активной областью показал, что надлежащим выбором параметров волновода можно добиться нулевой дисперсии групповой скорости между базовой волной с длиной 1100 нм и второй гармоникой с длиной волны 550 нм. При этом длина когерентности превышает 1 см. Таким образом, представленный волновод с ФК в сердцевине является эффективным устройством для удвоения частоты, способным генерировать когерентное излучение в видимом диапазоне из инфракрасного излучения накачки. Для экспериментальной демонстрации чрезвычайно широкой перестройки использовали непокрытый 16-миллиметровый КТР-кристалл, который был поляризован с периодом 12,47 мкм для ГВГ при 591,5 нм. Волновод с площадью поперечного сечения 4×4 мкм² был изготовлен методом ионного обмена, который обеспечил шаг показателя преломления Δn~0.01. С помощью этой технологии маскированный КТР погружали в ионообменную ванну, состоящую из смеси расплавленных нитратных солей Rb и Ba (RbNO₃ и Ва(NO₃)₂). Внутри этой ванны ионы Rb диффундировали через маску в субстрат, а ионы K рассеялись из кристалла KTP. В диффузных областях ионы Rb увеличивали показатель преломления относительно неупорядоченного KTП и, таким образом, формировали оптический волновод [4-6]. Полупроводниковый волновод с гребенкой с усилением имел ширину 5 мкм и длину 4 мм и имел заднюю фаску под углом 5° (относительно нормали к ней), чтобы значительно уменьшить его отражательную способность. Кроме того, обе



Рисунок 2. Наблюдаемые профили интенсивности второй гармоники (цветные изображения) и основные моды (красные изображения) в спектральной области между 567,7 и 629,1 нм. В центре: зависимость периода полинга от длины волны для мод волновода разного порядка для частотного удвоения в волноводе. В центре вставки - профиль интенсивности второго гармонического режима при 580,4 нм, наблюдаемый после его распространения через многомодовое волокно.

Материаловедение и наноматериалы

грани также имели обычные антиотражающие (AR) покрытия, в результате общая оценочная отражательная способность 2×10⁻³ для передней грани и менее 10⁻⁵ для угловой грани. Спектральные измерения проводились при комнатной температуре.

Из профилей интенсивности основной и ГВГ-мод представленных на рис.2 видно, что фазовая синхронизация между фундаментальными (красными изображениями) нижнего порядка и режимами второй гармоники высокого порядка (цветные изображения) соответствует ГВГ на синей стороне диапазона перестройки, а основные и низкоуровневые режимы ГВГ относятся к удвоению частоты на красной стороне диапазона перестройки. Эти результаты отлично согласуются с моделью многомодового взаимодействия. Эффект многолучевого выхода может быть сведен к минимуму путем изменения выходной мощности в многомодовом волокне.

Этот простой метод позволяет эффективно преобразовать моду высокого порядка в пучок гауссовой формы с M² ниже 3, как показано на центральной вставке к рис. 2. Показанный профиль интенсивности трансформированной формы пучка был получен для одной из самых высоких мод и оставался схожим для других длин волн.

Литература:

- K.A. Fedorova, G. S. Sokolovskii, P. R. Battle, D. A. Livshits,
 E. U. Rafailov «Green-to-red tunable SHG of a quantum-dot laser in a P.K. P waveguide» / Laser Phys. Lett. – 2012 – v.9 – p. 790-795.
- Савченко Г.М., Дюделев В.В., Соболева К.К., Лундин В.В., Сахаров А.В., Когновицкая Е.А., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Аверкиев Н.С., Соколовский Г.С. «Метаматериал для эффективной генерации второй гармоники» / Письма в ЖТФ.- 2016 – в. 20 – стр. 40-48.
- Савченко Г.М., Дюделев В.В., Лундин В.В., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Когновицкая Е.А., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Аверкиев Н.С., Соколовский Г.С. «Фотонно-кристаллический волновод для генерации второй гармоники» / ФТТ. – 2017. –в.9 – стр. 1680- 1683.
- K.A. Fedorova, G.S. Sokolovskii, P.R. Battle, D.A. Livshits, E. U. Rafailov, "574 nm – 647 nm wavelength tuning by second-harmonic generation from diode-pumped P.K. P waveguides", Opt. Lett., v.40(5), p.835-838, 2015.
- K.A. Fedorova, A. D. McRobbie, G. S. Sokolovskii, P. G. Schunemann, E. U. Rafailov, "Second harmonic generation in a low-loss orientationpatterned GaAs waveguide", Opt. Express, v.21(14), 16424-16430, 2013
- K.A. Fedorova, G.S. Sokolovskii, D.I. Nikitichev, P.R. Battle, D.A. Livshits, E.U. Rafailov, "Orange-to-red tunable picosecond pulses by frequency doubling in a diode-pumped P.K. P waveguide", Opt. Lett., 38, 2835-2837, 2013.

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭКСИТОНОВ, МАГНИТООПТИКА И СПИНТРОНИКА

НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ГАРМОНИК

Базовые подразделения - лаборатории Спектроскопии твёрдого тела, Оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах, Оптики полупроводников, Спиноптроники, Сектор теории квантовых когерентных явлений в твердом теле, Сектор теоретических основ микроэлектроники

Генерация оптических гармоник является широко распространенным методом исследования электронной структуры твердых тел и их нелинейных оптических свойств. В данном методе материал подвергается воздействию мошных лазерных импульсов с энергией фотонов *h*ω. Вследствие оптической нелинейности возникает сигнал на удвоенной энергии фотонов 2*h*ω, утроенной энергии – 3ħω и более высоких энергиях. Процесс генерации гармоник является когерентным и оказывается очень чувствительным к симметрии кристаллической решетки, к магнитной симметрии в случае магнитных материалов, а также к симметрии электронных состояний, участвующих в процессе генерации гармоник. В наших работах данный метод использован для изучения экситонных состояний в различных объёмных полупроводниках и низкоразмерных гетероструктурах. Получен большой объём информации, что позволяет говорить о формировании нового направления - нелинейной спектроскопии экситонов методом генерации оптических гармоник.

Я.И. Френкель в 1931 году ввёл фундаментальное понятие об экситоне как о бестоковом электронном бозе-возбуждении. Экситоны большого радиуса были теоретически предсказаны Г.Х. Ванье и Н.Ф. Моттом в 1937-1938 годах. Е.Ф. Гросс и Н.А. Каррыев в 1952 году экспериментально обнаружили эти квазичастицы в полупроводнике Cu2O. Данное открытие было зафиксировано в Государственном реестре в 1971 году с формулировкой "Экситон в полупроводниках и диэлектриках". Экситоны определяют оптические свойства полупроводников вблизи края запрещенной зоны, и понимание их свойств является принципиально важным как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений. В квантово-размерных полупроводниковых структурах роль экситонов только возрастает в силу того, что при уменьшении размерности увеличивается перекрытие волновых функций электрона и дырки.

Оптические методы были и остаются основными при исследовании экситонов. При этом, широко используются такие методы линейной оптики, как поглощение, пропускание, отражение, фотолюминесценция, эффекты Фарадея и Керра, эллипсометрия. Впервые в Институте были проведены подробные экспериментальные и теоретические исследования



Рисунок 1. (a) Спектральная зависимость интенсивности ГВГ в GaAs при низкой температуре во внешнем магнитном поле. (b) Схематическое представление ГВГ при возбуждении межзонных переходов в GaAs в магнитном поле. Показан энергетический спектр полупроводника в области края запрещенной зоны с учетом уровней Ландау (n – номера уровней орбитального квантования). Прямыми стрелками показаны два входящих фотона с энергией ћω и один выходящий с энергией 2ћω.



Рисунок 2. (а) Сравнение спектральных зависимостей интенсивности ГВГ в ZnO при низкой температуре в нулевом внешнем магнитном поле и поле В = 5 Т в области 2p/2s экситонов. [3]. (b) Возникновение эффективного электрического поля при движении экситона с массой Мехс и волновым вектором кехс во внешнем магнитном поле В за счёт действия силы Лоренца FLorentz.

экситонов методом генерации второй и третьей оптических гармоник (ГВГ и ГТГ) в различных объёмных полупроводниках GaAs [1, 2], CdTe [2, 3], ZnSe [2], ZnO [3, 4], Cu2O [5], (Cd,Mn)Te и низкоразмерных гетероструктурах ZnSe/BeTe [6]. Особое внимание уделено роли внешних электрических и магнитных полей, модифицирующих экситонные состояния и приводящих к новым механизмам генерации оптических гармоник. Рассмотрены микроскопические механизмы генерации гармоник, основанные на эффекте Штарка, спиновом и орбитальном эффектах Зеемана и на магнитном эффекте Штарка, специфичном для экситонов, двигающихся во внешнем магнитном поле.

В электродипольным приближении ГВГ разрешена по симметрии только в кристаллах без центра инверсии, в то время как ГТГ возможна как в нецентросимметричных, так и в центросимметричных кристаллах. Продолжительное время после открытия генерации оптических гармоник экспериментальные исследования этого явления в полупроводниках ограничивались измерениями на фиксированных лазерных линиях, когда энергии фотонов накачки и генерируемого излучения попадали в зону прозрачности. В наших работах измерения ГВГ и ГТГ в полупроводниках проводились в большом диапазоне температур образца от температуры жидкого гелия до комнатной, в широком спектральном диапазоне, а также с использованием внешних воздействий – электрического (Е) и магнитного (В) полей. Использование внешних полей Е и В может вызывать смешивание различных типов экситонных состояний и приводить к появлению новых механизмов генерации оптических гармоник. Основной частью экспериментальной установки для исследования спектров ГВГ и ГТГ является импульсная лазерная система, для возбуждения нелинейных процессов важна большая пиковая интенсивность лазерных импульсов [6].

В полупроводниках с нецентросимметричной кристаллической решеткой, таких как GaAs, CdTe, (Cd,Mn) Te, ZnSe (точечная группа 3m) и ZnO (точечная группа 6mm), ГВГ разрешена в электродипольном (ЭД) приближении. Источником ГВГ является нелинейная поляризация на удвоенной частоте 2ω для кристаллографического вклада, которая может быть записана в следующем виде:

$$P_i^{2\omega} = \epsilon_0 \chi_{ijl}^{cryst} E_j^{\omega} E_l^{\omega},$$
(1)

где *i, j, l* — декартовы индексы, ϵ_o – электрическая постоянная, χ_{ijl}^{cryst} – нелинейная оптическая восприим-

чивость, E_j^{ω} – компонента электрического поля лазера \mathbf{E}^{ω} на основной частоте ω . Выражение (1) учитывает только ЭД резонансные и нерезонансные вклады электронных состояний полупроводника на основной ω и удвоенной 2 ω частотах. Более общий подход может учитывать магнитодипольный (МД) и/или электро-квадрупольный (ЭК) вклады. С учетом этих вкладов эффективная нелинейная поляризация на удвоенной частоте 2 ω , может быть записана в виде:

$$P_{\text{eff, B, E, }i}^{2\omega}\left(\mathcal{E}_{\text{exc}}\right) = \epsilon_{0}\chi_{ijl}\left(\mathcal{E}_{\text{exc}}, \mathbf{k}_{\text{exc}}, \mathbf{B}, \mathbf{E}\right)E_{j}^{\omega}E_{l}^{\omega}$$
(2)

где $\epsilon_{\rm exc}$ – энергия экситона, нелинейная оптическая восприимчивость учитывает эффекты пространственной дисперсии в МД и ЭК приближениях и вклады внешних полей. $\mathbf{k}_{\rm exc}$ = 2n \mathbf{k}^{ω} есть волновой вектор экситона, n показатель преломления света на основной частоте ω , и \mathbf{k}^{ω} – волновой вектор входящего света.

Внешнее магнитное поле воздействует на электронные состояния через движущиеся заряды, приводя к орбитальному квантованию вследствие циклотронного движения электронов и дырок. Индуцированная магнитным полем ГВГ на состояниях магнито-экситонов в GaAs показана на рис. 1а. Сигнал ГВГ появляется в поле и растет по интенсивности как квадратичная функция магнитного поля. С ростом поля в спектре появляется все больше линий, которые сдвигаются в сторону бо́льших энергий. На рис. 1b схематически показано возникновение сигналов ГВГ при возбуждении межзонных переходов в GaAs в магнитном поле.

В GaAs впервые наблюдался гигантский рост ГТГ на 1s-экситоне в магнитном поле [2]. ГТГ измерялась на GaAs в двух геометриях (Фарадея и Фогта) ориентации внешнего магнитного поля. В обоих случаях наблюдался очень сильный рост интенсивности ГТГ, которая в поле 10 Т увеличивалась до 50 раз для геометрии Фогта и в 25 раз для геометрии Фарадея. Проведенный теоретический анализ показал, что этот яркий эффект можно объяснить аномальной дисперсией в области экситон-поляритонных состояний, ростом силы осциллятора экситона в магнитном поле и поглощением сигнала ГТГ при распространении в образце GaAs. Модельный расчёт позволил объяснить рост ГТГ в десятки раз, и выделить рост силы осциллятора как основного механизма усиления.

Детальное экспериментальное и теоретическое исследование различных механизмов, отвечающих за индуцированную магнитным полем ГВГ на экситонных состояниях, было проведено в модельном и хорошо исследованном полупроводнике ZnO. На рис. 2а показаны спектральные зависимости интенсивности ГВГ в ZnO в нулевом внешнем магнитном поле и поле В = 5 Т в области 2p/2s экситонов [3]. Сигнал отсутствует для k^ω úú [0001] в нулевом внешнем магнитном поле и появляется поле В = 5 Т в области 2p/2s экситонов. Экспериментальный и теоретический анализ, проведенный в работе [3], показал, что сильный сигнал появляется за счет магнитного эффекта Штарка. Эффективное электрическое поле, при движении экситона во внешнем магнитном поле смешивает экситонные состояния 2s и 2p (см. рис. 2b) и приводит к сильному сигналу ГВГ. В работе [4] обсуждаются три возможных механизма для индуцированной магнитным полем ГВГ: спиновый эффект Зеемана, орбитальный эффект Зеемана и магнитный эффект Штарка. Все рассмотренные механизмы ГВГ проявились на экситонных состояниях в ZnO.

Полумагнитный полупроводник (Cd,Mn)Те является модельным материалом для демонстрации вкладов в ГВГ, связанных со спиновым расщеплением экситонов. (Cd,Mn)Те является структурным аналогом диамагнитных полупроводников CdTe и (Cd,Mg)Te, в которых наблюдалась ГВГ, индуцированная магнитным полем за счет орбитального квантования.

В заключение, методом генерации оптических гармоник проведено исследование экситонных свойств нескольких объёмных полупроводников и низкоразмерных гетероструктур, которые недоступны методами линейной оптической спектроскопии. Получены новые данные об энергетической и спиновой структурах экситонных состояний и раскрыты механизмы оптических нелинейностей. Это позволяет говорить о формировании нового направления – нелинейной спектроскопии экситонов методом генерации оптических гармоник. Часть представленных исследований вошла в обзорные работы по нелинейной оптической спектроскопии полупроводников [6, 7].

Экспериментальные исследования проводились при тесном сотрудничестве ФТИ им. А.Ф. Иоффе с Техническим университетом Дортмунда (Германия).

Литература:

- Brunne D., Lafrentz M., Pavlov V. V., Pisarev R. V., Rodina A. V., Yakovlev D. R., Bayer M. // Electric field effect on optical harmonic generation at the exciton resonances in G.A. // Phys. Rev. B 2015, Vol. 92, P. 085202.
- Warkentin W., Mund J., Yakovlev D. R., Pavlov V. V., Pisarev R. V., Rodina A. V., Semina M. A. Glazov M. M., Ivchenko E. L., Bayer M. //

Third harmonic generation on exciton-polaritons in bulk semiconductors subject to a magnetic field $/\!/$ Phys. Rev. B 2018, Vol. 98, P. 075204.

- Lafrentz M., Brunne D., Kaminski B., Pavlov V. V., Rodina A. V., Pisarev R. V., Yakovlev D. R., Bakin A., Bayer M. // Magneto-Stark effect of excitons as the origin of second harmonic generation in Z. O.// Phys. Rev. Lett. 2013, Vol. 110, P. 116402.
- Lafrentz M., Brunne D., Rodina A. V., Pavlov V. V., Pisarev R. V., Yakovlev D. R., Bakin A., Bayer M. // Second-harmonic generation spectroscopy of excitons in Z. O.// Phys. Rev. B 2013, Vol. 88, P. 235207.
- Mund J., Fröhlich D., Yakovlev D. R., Bayer M. // High-resolution second harmonic generation spectroscopy with femtosecond laser pulses on excitons in Cu2O // Phys. Rev. B 2018, Vol. 98, P. 085203.
- Яковлев Д. Р., Павлов В. В., Родина А. В., Писарев Р. В., Mund J., Warkentin W., Bayer M. // Экситонная спектроскопия полупроводников методом генерации оптических гармоник (Обзор) // ФТТ 2018, Том 60, С. 1463.
- Yakovlev D. R., Warkentin W., Brunne D., Mund J., Pavlov V. V., Rodina A. V., Pisarev R. V., Bayer M. // Novel mechanisms of optical harmonic generation on excitons in semiconductors // Proc. of S. I. 2015, Vol. 9503, P. 950302.

ЛИНЕЙНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МАГНИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ, МУЛЬТИФЕРРОИКОВ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКОВ

Базовые подразделения - лаборатории Оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах, Магнетизма и сегнетоэлектричества, Спектроскопии твердого тела, Физики ферроиков

Первые исследования по оптической спектроскопии магнитных диэлектриков (МД), мультиферроиков (МФ) и магнитоэлектриков (МЭ) были начаты еще в семидесятые годы прошлого столетия в Отделе сегнетоэлектричества и магнетизма под руководством член-корр. АН СССР Г.А. Смоленского. Исследования в этих направлениях развивались и продолжаются в настоящее время в Институте в четырёх лабораториях.

МД, МФ и МЭ представляют собой классы твердотельных материалов или композитных структур, в которых имеется магнитное упорядочение, а в случае МФ и МЭ еще и достаточно хорошо выраженная связь между магнитными, электрическими, а также и оптическими свойствами. В работах Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшица и И.Е. Дзялошинского было показано, что такая связь может реализоваться только при соблюдении некоторых строгих симметрийных правил в отношении кристаллических структур и типа магнитного порядка. Наличие такой связи открывает очень интересные возможности «перекрестного» контроля электрических свойств материала (электрическая поляризация, диэлектрическая проницаемость, и др.) с помощью внешних магнитных полей, и изменять магнитные свойства (магнитная восприимчивость, намагниченность, анизотропия, и др.) с помощью внешних электрических полей. Исследования МД, МФ и МЭ материалов и структур широко ведутся по всему миру, и счет публикаций по этой тематике перешел за десятки тысяч. Уже имеется множество сообщений о конкретных применениях таких материалов для создания приборов с мультифункциональными свойствами, но возможности практического использования таких материалов еще далеко не исчерпаны.

В ФТИ исследования ведутся преимущественно с использованием как традиционных методов линейной оптической спектроскопии, так и более современных методов нелинейной и сверхбыстрой спектроскопии на различных группах материалов. Ниже будут рассмотрены несколько характерных примеров.

Мультиферроики-манганиты типа *R*MnO₃, где *R* редкоземельный ион, кристаллизуются в гексагональной нецентросимметричной структуре, и в диапазоне температур ниже примерно 1000 К они являются сегнетоэлектриками (СЭ). Ион Mn³⁺(3*d*⁴) является Ян-Теллеровским ионом и обладает магнитным моментом. Ниже примерно 100 К эти материалы испытывают переход в упорядоченное антиферромагнитное (АФМ) состояние, что открывает интересные возможности проявления взаимодействий между электрической и магнитной подсистемами. Одним из таких проявлений было обнаруженное взаимодействие между сегнетоэлектрическими (СЭ) и антиферромагнитными (АФ) доменными стенками, как это показано на Рис. 1. Это явление было зарегистрировано с использованием разработанного оригинального метода спектроскопической генерации второй оптической гармоники (ГВГ) для регистрации СЭ и АФМ доменов (исследование проводилось в сотрудничестве с Техническим университетом г. Дортмунда, Германия).

Другой класс редкоземельных манганитов типа *R*Mn₂O₅ с орторомбической структурой демонстрирует не менее интересные свойства, связанные с взаимодействием между электрической и магнитной подсистемами. В отличие от *R*MnO₃, кристаллы этого типа являются центросимметричными, т.е. не должны обладать спонтанной электрической поляризацией. Тем не менее, было установлено, что спонтанная



Рисунок 1. Сосуществование СЭ и АФМ доменов и взаимодействие стенок в YMnO₃. Изображения отличаются только за счет использования различных поляризаций света накачки и второй гармоники.







Рисунок 3. Спектры поглощения CuB₂O₄ в трех независимых α-, σ- и π- поляризациях, что позволило однозначно различить две магнитные подсистемы ионов Cu²⁺

электрическая поляризации возникает ниже температуры магнитного упорядочения в районе 30-40 К, и источником поляризации является неколлинеарный тип магнитной структуры. Это было нами подтверждено в результате подробных исследований оптической ГВГ выше и ниже температуры магнитного упорядочения в магнитных полях до 7 Т (см. Рис. 2).

Ярким примером магнитоэлектрика оказался борат меди CuB₂O₄, который кристаллизуется в необычной тетрагональной нецентросимметричной структуре -42m (Z=12). Его магнитные свойства определяются Ян-Теллеровскими ионами Cu2+ (3d9, спин S=1/2) в двух неэквивалентных позициях. Это приводит к весьма специфическому антиферромагнитному упорядочению ниже T_{N} = 21 К и сложной фазовой диаграмме. Этот материал оказался совершенно уникальным по своим линейным и нелинейным оптическим свойствам. Так, при низких температурах в спектрах поглощения и второй оптической гармоники была зарегистрирована чрезвычайно богатая тонкая структура, образуемая безфононными линиями на 3d переходах и многочисленными фононными повторениями (Рис. 3) [1]. Тонкая структура с высокой степенью поляризации вплоть до

100% наблюдалась на всех электронных переходах в обеих магнитных подсистемах иона Cu²⁺, что позволило впервые для 3*d* электронных переходов рассчитать истинные, а не усредненные, значения параметров кристаллического поля. Исследование в магнитном поле позволило наблюдать явление антиферромагнитного (AФM) дихроизма и зафиксировать ранее не наблюдавшийся фазовый переход в области 7–9K (Рис. 4) [2]. В этом материале также наблюдалась невзаимность поглощения и люминесценции.

Подавляющее большинство исследований МД, МФ и МЭ ведется на оксидных соединениях переходных и редкоземельных металлов. Однако в самое последнее время появились теоретические работы, в которых предсказывается возможность мультиферройных свойств во фторидах со структурой перовскита типа *ABF*₃. С целью экспериментальной проверки этих теоретических предсказаний были проведены исследования комплексной диэлектрической проницаемости ε(T) в диапазоне температур 5–400К и частот 20 Гц - 1 МГц. Исследование большой группы магнитных и диамагнитных фтороперовситов с кубической, орторомбической и гексагональной структурами позволило выявить новые закономерности в температурном поведении диэлектрической проницаемости.



Рисунок 4. Температурная зависимость АФМ дихроизма CuB₂O₄ на безфононной линии 1.4 эВ. Два набора кривых соответствуют двум противоположным направлениям поля.



Рисунок 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ε(T) в ромбическом NaMnF₃ вдоль «мягкой» оси b. Сильное изменение ε(T) (около 170%) позволило отнести этот материал к квантовым (incipient) мультиферроикам [3].

Вчастности, было показано, что орторомбический кристалл NaMnF₃ с наименьшим значением структурного толеранс-фактора t=0.78 проявляет характерные признаки квантового (incipient) параэлектрика. Как показано на Рис. 5 [3], диэлектрическая проницаемость ε(T) сильно возрастает при понижении температуры и эта зависимость может быть хорошо описана формулой Баррета (Barrett). При температурах ниже магнитного упорядочения наблюдается магнитодиэлектрический эффект, т.е. изменения є(Т) за счет магнитного упорядочения, достигающий 25%, что намного превосходит аналогичный эффект в других магнитных кристаллах. Такое поведение диэлектрической проницаемости при понижении температуры позволило отнести NaMnF₃ к редкому классу квантовых (incipient) мультиферроиков [3].

Особый интерес представляют не только статические, но и динамические свойства магнетиков и мультиферроиков. Одним из методов, позволяющих одновременно исследовать спиновую и решеточную динамику, является спектроскопия комбинационного рассеяния света. Уникальным отличием метода является чувствительность к двухмагнонным возбуждениям, отражающим, в отличие от одномагнонного



Рисунок 6. Температурная зависимость спектров комбинационного рассеяния PbFeBO₄ [4]. І – оптический магнон, II – двухмагнонная полоса, III – подавление квазиупругого рассеяния, соответствующего магнитным флуктуациям.

рассеяния, дисперсию магнонов вдали от центра зоны Бриллюэна. Интенсивные двухмагнонные полосы были обнаружены в сложно структурных ромбических антиферромагнетиках PbFeBO₄ [4] (см. Рис. 6) и Ni₂NbBO₆ [5]. Наличие антисимметричного обмена в PbFeBO₄ и нетривиальной комбинации анизотропий типа легкая ось и легкая плоскость в моноклинном NiWO₄ [6] проявилось в активации магнонных ветвей. Энергия, поляризация и температурные зависимости магнитных возбуждений позволяют количественно определять постоянные обменного взаимодействия и одноионной анизотропии магнетиков.

Литература:

- R. V. Pisarev, K. N. Boldyrev, M. N. Popova, A. N. Smirnov, V. Yu. Davydov, L. N. Bezmaternykh, M. B. Smirnov, and V. Yu. Kazimirov, Lattice dynamics of piezoelectric copper metaborate CuB2O4, Phys. Rev. B 88, 024301 (2013).
- K. N. Boldyrev, R. V. Pisarev, L. N. Bezmaternykh, and M. N. Popova, Antiferromagnetic Dichroism in a Complex Multisublattice Magnetoelectric CuB₂O₄, Phys. Rev. Lett. 114, 247210 (2015).
- R. M. Dubrovin, S. A. Kizhaev, P. P. Syrnikov, J.-Y. Gesland, and R. V. Pisarev,

Unveiling structural instability and magnetodielectric effect in manganese

fluoroperovskites AMnF3, Phys. Rev. B 98, 060403(R) (2018).

- M. A. Prosnikov, A. N. Smirnov, V. Y. Davydov, K. A. Sablina, and R. V. Pisarev, Lattice and magnetic dynamics of a quasi-one-dimensional chain antiferromagnet PbFeBO4, J. Phys.: Condens. Matter 29, 025808 (2016).
- 5. M. A. Prosnikov, A. N. Smirnov, V. Yu. Davydov, R. V. Pisarev, N. A. Lyubochko, and S. N. Barilo, Magnetic

dynamics and spin-phonon coupling in the antiferromagnet Ni₂NbBO₆, Phys. Rev. B. 98 (2018) (accepted).

 M. A. Prosnikov, V. Y. Davydov, A. N. Smirnov, M. P. Volkov, R. V. Pisarev, P. Becker, and L. Bohatý, Lattice and spin dynamics in a lowsymmetry antiferromagnet NiWO4, Phys. Rev. B. 96, 014428 (2017).

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ – ХАЛЬКОГЕНИДАХ ЕВРОПИЯ

Базовые подразделения - Лаборатории Оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах, Спектроскопии твёрдого тела, Спиноптроники

Магнитные полупроводники EuX (X = O, S, Se, Te) являются интересными объектами фундаментальных научных исследований, так как обладают рядом уникальных электронных, магнитных, оптических и магнитооптических свойств. В данной статье рассмотрен ряд новых линейных и нелинейных оптических явлений, исследованных в этих материалах за последние несколько лет. В EuTe и EuSe обнаружен новый тип нелинейного магнитооптического эффекта, представляющего собой генерацию манитодипольной второй оптической гармоники, связанной с магнитным упорядочением спинов ионов Eu2+. В магнитных полупроводниках EuX исследованы фотоиндуцированные спиновые поляроны с очень большим значением магнитного момента, предложен оригинальный оптический метод исследования магнитных поляронов.

В последнее десятилетие усилия многих учёных и технологов были направлены на поиск и исследование новых материалов, представляющих интерес для устройств спинтроники или спиновой электроники. Спинтроника принципиально отличается от традиционной электроники тем, что в дополнение к зарядовому состоянию электрона его спин может использоваться как дополнительная степень свободы или бит информации. Использование спиновой степени свободы может дать принципиальную возможность создания новых эффективных систем обработки, хранения и передачи данных. Зачастую предполагается, что устройства спинтроники будут реализованы с использованием разбавленных магнитных полупроводников, таких как, например, (Cd,Mn)Те или (Ga,Mn)As. Однако собственные магнитные полупроводники – халькогениды европия EuX (X = O, S, Se, Te) имеют не меньший практический потенциал для создания систем спинтроники или спиновой оптоэлектроники.

Халькогениды европия EuX (X = O, S, Se, Te) представляют собой компактную группу магнитных полупроводников, обладающих уникальными электронными, магнитными, оптическими и магнитооптическими свойствами. Физические свойства халькогенидов европия EuX определяются электронной структурой ионов Eu2+, имеющих сильно локализованные 4f7 электроны с большим спином S = 7/2. EuX являются соединениями с классическим гейзенберговским обменным взаимодействием, в которых конкуренция двух типов обменных интегралов приводит к различным магнитным фазовым диаграммам, которые могут включать антиферромагнитный (АФМ), ферримагнитный (ФиМ) и ферромагнитный (ФМ) типы магнитного упорядочения. Например, EuTe является антиферромагнетиком с температурой Нееля TN = 9.6 K, а EuSe является метамагнетиком с температурой Нееля TN = 4.6 K и может проявлять АФМ, ФиМ и ФМ типы магнитного упорядочения в зависимости от приложенного внешнего магнитного поля.

Халькогениды европия EuX являются центросимметричными кристаллами со структурой галита – каменной соли (точечная группа m3m). В Институте была впервые экспериментально исследована оптическая нелинейность нового типа, отвечающая за генерацию второй гармоники (ГВГ). Показано, что источником ГВГ является нелинейная оптическая поляризация P_{2ω}, связанная с магнитодипольным вкладом:

 $P^{2\omega} = \epsilon_0 \chi^{(3)} : E^{\omega} B^{\omega} M$, (1) где $\chi^{(3)}$ – оптическая нелинейная восприимчивость третьего порядка, E^{ω} и B^{ω} – электрическое и магнитное

поля электромагнитной волны на фундаментальной

частоте о, **М** – намагниченность, индуциров`анная внешним магнитным полем.

В магнитных полупроводниках EuTe и EuSe исследовались спектральные и полевые зависимости, а также врашательные анизотропии спин-индуцированной ГВГ на краю запрещённой зоны. На рис. 1а показана полевая зависимость интенсивности ГВГ в EuSe. Хорошо видны скачки сигнала ГВГ, связанные с магнитными фазовыми переходами $A\Phi M \rightarrow \Phi \mu M$ и $\Phi \mu M \rightarrow \Phi M$. На рис. 1b схематически показано возникновение ГВГ при возбуждении межзонных переходов в EuX. В АФМ фазе ГВГ не наблюдается, однако при приложении внешнего магнитного поля ГВГ возникает вследствие нарушения антиферромагнитного порядка и появления индуцированной намагниченности. Наблюдаемые спин-зависимые сигналы ГВГ возникают вследствие оптической нелинейности магнитодипольного типа. феноменологически описываемой выражением (1).

В EuTe и EuSe было проведено экспериментальное и теоретическое исследование генерации третьей оптической гармоники (ГТГ). В данных материалах



Рисунок 1. (a) Зависимость интенсивности ГВГ от внешнего магнитного поля в EuSe при низкой температуре. (b) Схематическое представление ГВГ при возбуждении межзонных переходов в EuX. Прямыми стрелками показаны два входящих фотона на фундаментальной частоте ω и один выходящий на удвоенной частоте 2ω.

метод ГТГ позволяет эффективно изучать как кристаллографические, так и индуцированные магнитным полем вклады, а также электронную зонную структуру. В отличие от ГВГ. сигналы ГТГ электродипольного типа наблюдаются в нулевом магнитном поле. поскольку кристаллографическая точечная группа симметрии EuTe и EuSe (m3m) допускает существование таких вкладов. На основе теоретического рассмотрения электронной зонной структуры EuTe и EuSe экспериментально обнаруженные резонансы в спектрах ГВГ были привязаны к конкретным электронным переходам между основным состоянием 4f7 в верхней части валентной зоны и возбужденными состояниями 4f65d1 ионов Eu²⁺, которые образуют дно зоны проводимости. Сильная модификация сигналов ГТГ наблюдалась в приложенном внешнем магнитном поле в области энергии фотонов 2ћω = 2.4 эВ, что дает однозначное доказательство существования магнитоиндуцированного вклада в ГТГ.

В халькогенидах европия EuTe и EuSe проведено исследование фотоиндуцированного эффекта Фарадея методом оптической накачки и зондирования с использованием непрерывных лазеров и широкополосного источника света [1, 2]. Фотоиндуцированное фарадеевское вращение исследовано как функция интенсивности света. магнитного поля и температуры. На рис. 2а показаны полевые зависимости фотоиндуцированного эффекта Фарадея в EuTe при различных интенсивностях оптической накачки. Установлено, что при резонансном возбуждении оптического электродипольного перехода $4f^75d^0 \rightarrow 4f^65d^1$ в EuTe образуются магнитные поляроны с квантовой эффективностью около 10% и магнитным моментом, превышающим 600 µВ для EuTe [1] и 6000 µВ EuSe [2] при низкой температуре. Магнитные поляроны – это квазичастицы с высокой степенью ферромагнитного порядка спинов ионов Eu²⁺. возникающие благодаря обменному взаимодействию фотовозбуждённого d-электрона и локализованных *f*-электронов.

Магнитные поляроны с большой эффективной массой представляют собой сферы радиуса нескольких нанометров (см. рис. 2). Температурная зависимость магнитного момента поляронов хорошо описывается законом Кюри-Вейса. Выше температуры 100 К



Рисунок 2. Полевые зависимости фотоиндуцированного эффекта Фарадея в EuTe при различных интенсивностях оптической накачки [1]. (а) Показана равновесная решётка антиферромагнетика. (б) Фотовозбужденный электрон описывается боровской волновой функцией и поляризует спины решетки в преимущественном направлении в радиусе R_{pd} = 4a, образуя магнитный полярон. (с) Фотоиндуцированные поляроны образуют парамагнитный ансамбль. В нулевом магнитном поле каждый полярон имеет произвольную ориентацию, а средний магнитный момент равен нулю. (d) Внешнее магнитное поле ориентирует поляроны при низкой температуре [4].



Рисунок 3. (а) Установка, использующая метод оптической накачки и зондирования; М - зеркало, LP - линейный поляризатор, $\lambda/2$ — полуволновая пластина, WP – призма Волластона, PD – фотодиод. (b) Временные завсимости фотоиндуцированного оптического вращения в EuTe для различных значений внешнего магнитного поля. На вставке схематично показана экспериментальная геометрия [5].

происходит термическое гашение поляронов с энергией активации ~0.01 эВ. С увеличением интенсивности возбуждающего света наблюдается насыщение концентрации магнитных поляронов на уровне около 4.5×10¹⁵ см⁻³ ЕиТе, что позволяет предположить, что поляроны закреплены на дефектах кристаллической структуры [1]. В EuSe такого насыщения не наблюдается, и кристалл EuSe может быть полностью переведён в поляризованное ферромагнитное состояние благодаря фотовозбуждению гигантских собственных спиновых поляронов [2]. Разработана квантово-механическая модель для расчёта фотоиндуцированного фарадеевского вращения, связанного с образованием гигантских магнитных поляронов [3]. Теоретический расчёт хорошо описывает наблюдаемые в эксперименте зависимости. Таким образом, продемонстрирован новый подход к оптическому управлению магнитным состояниям в халькогенидах европия EuX, который может быть в принципе применён к любым магнитным полупроводникам, разбавленным магнитным

полупроводникам и магнитным диэлектрикам.

Метод оптической накачки и зондирования с временным разрешением (см. рис. За) был применён для изучения сверхбыстрой динамики в магнитном полупроводнике EuTe вблизи края запрещенной зоны. На рис. Зb показаны временные зависимости фотоиндуцированного оптического вращения в EuTe для различных величин магнитного поля. Установлено, что внешнее магнитное поле приводит к переключению от обратного эффекта Фарадея к явлению оптической ориентации. Предложена теоретическая модель, описывающая оба наблюдаемых процесса с различными спектральными и временными свойствами. Свет с круговой поляризацией возбуждает электронный переход $4f^{7}5d^{0} \rightarrow 4f^{6}5d^{1}$ в EuTe, а наблюдаемое переключение связанно с сильным сдвигом края запрещенной зоны в EuTe в магнитном поле при низких температурах. Экспериментально показано, что манипуляция спиновыми состояниями в EuTe происходит в пикосекундном диапазоне времён в магнитных полях до 6 Т.

В заключение, проведено исследование ряда новых линейных и нелинейных оптических эффектов в магнитных полупроводниках EuX. Часть представленных исследований вошла в обзорные работы по нелинейной оптической спектроскопии полупроводников [6, 7].

Экспериментальные исследования проведены при тесном сотрудничестве ФТИ им. А.Ф. Иоффе с Техническим университетом Дортмунда (Германия) и Университетом Сан-Паулу (Бразилия).

Литература:

- Henriques A. B., Naupa A. R., Usachev P.A., Pavlov V. V., Rappl P. H. O., Abramof E. // Photoinduced giant magnetic polarons in E. T. // Phys. Rev. B 2017, Vol. 95, P. 045205.
- Henriques A. B., Gratens X., Usachev P.A., Chitta V.A., Springholz G. // Ultrafast Light Switching of Ferromagnetism in E. S. // Phys. Rev. Lett. 2018, Vol. 120, P. 217203.

- Henriques A. B., Usachev P.A. // Faraday rotation by the undisturbed bulk and by photoinduced giant polarons in E. T. // Phys. Rev. B 2017, Vol. 96, P. 195210.
- Henriques A. B., Galgano G. D., Rappl P. H. O., Abramof E. // Light-induced polaron magnetization in E. T. at temperatures reaching 150 K // Phys. Rev. B 2016, Vol. 93, P. 201201(R).
- Pavlov V. V., Pisarev R. V., Nefedov S. G., Akimov I. A., Yakovlev D. R., Bayer M., Henriques A. B., Rappl P. H. O., Abramof E. // Magneticfield-induced crossover from the inverse Faraday effect to the optical orientation in E. T. // J. Appl. Phys. 2018, Vol 123, P. 193102.
- Yakovlev D. R., Warkentin W., Brunne D., Mund J., Pavlov V. V., Rodina A. V., Pisarev R. V., Bayer M. // Novel mechanisms of optical harmonic generation on excitons in semiconductors // Proc. of S. I. 2015, Vol. 9503, P. 950302.
- Яковлев Д. Р., Павлов В. В., Родина А. В., Писарев Р. В., Mund J., Warkentin W., Bayer M. // Экситонная спектроскопия полупроводников методом генерации оптических гармоник (Обзор) // ФТТ 2018, Том 60, С. 1463.

МАГНЕТИЗМ И СПИНОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСИСТЕМАХ. СПИНТРОНИКА.

Базовые подразделения – лаборатории Оптики полупроводников и СпинОптроники

Интенсивное развитие нанотехнологий привело к бурному развитию информационных технологий. С уменьшением размеров вычислительных элементов возрастает быстродействие, плотность записи информации, но в то же время возникают проблемы, связанные с теплоотводом, а также с физическими ограничениями на дискретность вещества, туннельные явления. Один из возможных путей преодоления этих проблем предлагает спинтроника (спиновая электроника) — принципиально новый подход, использующий магнитный момент (спин электрона) не только для записи и хранения информации, но и для проведения вычислений. Спины - это кванты информации будущих оптических и квантовых компьютеров. Задача состоит в том, чтобы детально исследовать спиновые явления в кристаллических структурах и на основе этого понять принципы управления угловым моментом (спином) с помощью внешнего электрического, оптического и магнитного полей. Будущие устройства спинтроники, разработанные на основе этого знания, будут обладать такими важными преимуществами как высокое быстродействие, малые токи утечки, небольшая энергия переключения, энергонезависимость. Можно обозначить несколько перспективных направлений полупроводниковой спинтроники.

Гибридные системы ферромагнетик/полупроводник для компьютеров нового поколения [1].

Для создания компьютеров нового поколения необходимо решить проблему интеграции магнетизма в полупроводниковую электронику. Естественным кандидатом являются гибридные системы ферромагнетик/ полупроводник (ФМ/ПП). Уникальность структуры ФМ/ ПП заключается в сочетании магнетизма и возможности управления концентрацией носителей заряда в полупроводнике, что приведет к электрическому управлению магнетизмом объединенной системы. Ключевым здесь является вопрос о том, на какое расстояние могут передаваться спин-спиновые взаимодействия от ферромагнетика к полупроводнику – от этого зависят функциональные возможности устройства, основанного на гибридах. Самое сильное взаимодействие обменное, обусловлено перекрытием волновых функций, т.е. короткодействующее. В гетероструктуре Со/ CdMgTe/CdTe/CdMgTe, в которой ферромагнитная



Рисунок 1. Иллюстрация циркулярно-поляризованной фононной моды режима в гибридной структуре ферромагнетик-КЯ. Энергетическая диаграмма: циркулярно поляризованный фонон с энергией связывает состояние тяжелой дырки +3/2 с возбужденным состоянием легкой дырки +1/2, индуцируя зависящий от спина сдвиг уровней спиновых дырок – фононный аналог оптического динамического эффекта Штарка. пленка Со находится на расстоянии ~ 10 нм от квантовой ямы CdTe обнаружено новое дальнодействующее эффективное обменное взаимодействие, не ограниченное перекрытием волновых функций. Выдвинута гипотеза о том, что это взаимодействие осуществляется с помощью поперечных акустических колебаний кристаллической решётки, поляризованных по кругу, вблизи магнон-фононного резонанса (см. рис. 1).

Спиновые взаимодействия и гигантские магнитооптические эффекты в разбавленных магнитных полупроводниках [2,3].

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП), сочетающие свойства полупроводника и магнитного материала, исследуются уже примерно тридцать лет (типичные представители CdMnTe, GaMnAs и др.). В последние годы интенсивность этих исследований колоссально возросла в связи с перспективами практического применения в спиновой электронике (спинтронике). Структуры на основе РМП предоставляют богатые возможности как по управлению спиновым состоянием электронов, так и по генерации носителей с высокой спиновой поляризацией. Среди множества ключевых результатов, полученных в ФТИ в этой области, можно выделить:

- Исследования экситонных магнитных поляронов локальных областей магнитного порядка, поддерживаемых обменным взаимодействием фотовозбужденного экситона с магнитными ионами.
 Исследования выявили возможность оптической поляризации полярона, иерархию времен формирования, роль флуктуаций намагниченности и локализации экситона в его образовании;
- Обнаружение эффектов коллективной спиновой динамики в низкоразмерных РМП структурах, обусловленных прецессией спинов многих магнитных ионов в обменном поле двумерной дырки. Последнее явление может быть использовано для управ-

ления намагниченностью наноструктур в пикосекундном масштабе времен.

GaMnAs является одним из прототипов ферромагнитного полупроводника, который проявляет необычные характеристики, обусловленные тем, что он совмещает в себе одновременно свойства ферромагнетика и полупроводника. Хотя GaMnAs является одним из наиболее изученных ферромагнитных полупроводников, его зонная структура и природа ферромагнетизма до сих пор не понята до конца. Прежде всего, несмотря на все усилия, предложенные механизмы косвенного обмена являются противоречивыми и широко дискутируются. Известно, что прямое взаимодействие центров марганца в (Ga,Mn)As отсутствует и ферромагнетизм обусловлен наличием дырок. Поэтому одним из важных вопросов является вопрос о том, как дырка, локализованная в примесной зоне, или свободная дырка валентной зоны переносит спиновую поляризацию от одного магнитного иона к другому. С этой целью были исследованы механизмы поперечной спиновой релаксации ионов Mn в ферромагнитном полупроводнике (Ga, Mn)As методом неупругого рассеяния света с переворотом спина. Экспериментально измерялась зависимость ширины линии рассеяния от температуры (см. рисунок 2).

Полученные экспериментальные зависимости ширины линии рассеяния от температуры хорошо описываются в рамках, разработанной феноменологической модели (сплошные линии на рис.1), описывающей поведение спина марганца в сильно коррелированной спиновой системе. Спиновая динамика ансамбля дырок и ионов марганца описывалась в терминах полей намагниченности этих подсистем. Вследствие сильного спин-орбитального взаимодействия в валентной зоне арсенида галлия, подсистема дырок является эффективным каналом релаксации для подсистемы спинов Mn. Анализ экспериментальных кривых (рис.2) позволил нам идентифицировать два вклада в ширину линии неупругого рассеяния с переворотом спина.





Первый вклад доминирует при температурах ниже температуры Кюри и связан с быстрой спиновой релаксацией дырок, вызывающей затухание коллективного движения связанных подсистем спинов. Другой вклад в спиновую релаксацию Mn связан со спиновыми флуктуациями ансамбля дырок, которые растут с температурой и становятся доминирующими в парамагнитной фазе.

Магнитные свойства немагнитных полупроводниковых нанокристаллов [3, 4].

Современные технологии позволяют синтезировать полупроводниковые коллоидные нанокристаллы и композитные наноструктуры на их основе различной формы: сферические нанокристаллы, вытянутые одномерные нанопалочки (нанороды), плоские двумерные нанопластины (наноплателеты). Последние годы интерес к полупроводниковым коллоидным нанокристаллам растет, поскольку такие кристаллы представляют перспективные структуры для оптоэлектроники, биологии и медицины, для создания приборов и



Рисунок 3. Схема динамической поляризации спинов оборванных связей на поверхности нанокристалла и формирования магнитного полярона в процессе оптического возбуждения и излучательной рекомбинации темного экситона с одновременным переворотом спинов электрона и оборванной связи.

устройств наноэлектроники, использующих спиновую степень свободы.

Так как носители заряда концентрируются в очень малом объеме, то усиливаются все взаимодействия между ними, в том числе те, что зависят от спина частиц. Вторая важная особенность таких структур — на поверхности нанокристалла существуют оборванные связи, представляющие собой локализованные парамагнитные центры. Такие локализованные спины могут создавать локальные магнитные поля, действующие на спины носителей заряда. И наконец, чисто геометрическое соображение – с уменьшением размеров кристалла растет относительная роль поверхности.

Достигнут существенный прогресс в понимании механизма рекомбинации оптически запрещенного или темного экситона в нанокристалле. Предложена и развита модель, объясняющая особенности низкотемпературных оптических спектров полупроводниковых коллоидных нанокристаллов. В основе модели – обменное взаимодействие носителей заряда с магнитными моментами оборванных связей на поверхности нанокристалла. В результате этого взаимодействия одновременно переворачиваются спин на поверхности кристалла и спин электрона в экситоне, в результате чего снимается запрет по спину, происходит рекомбинация электрона и дырки и испускается фотон.

Предсказано новое явление - возникновение макроскопического магнитного момента в результате динамической поляризации спинов оборванных связей. Динамическая поляризация происходит при температурах ниже критической в процессе оптического возбуждения и излучательной рекомбинации и приводит к формированию магнитного полярона. В то же время, формирование полярона приводит к стоксову сдвигу фотолюминесценции и уменьшению ее интенсивности, что позволяет оптически детектировать данное явление. Теоретические предсказания нашли полное подтверждение в специально спланированных экспериментальных исследованиях: установлено формирование магнитного полярона в немагнитных нанокристаллах CdSe диаметра 2.8 нм и определена его максимальная энергия связи порядка 7 мэВ. Продолжающиеся исследования показывают, что магнетизм, обусловленный неспаренными поверхностными спинами, проявляется и в других типах коллоидных нанокристаллов, например, двумерных наноплателетах.





Рисунок 4.

Спин-зависимая рекомбинация и сверхтонкое взаимодействие на глубоких парамагнитных дефектах [5, 6].

Принципиальным требованием к создаваемым устройствам спинтроники является возможность достижения и сохранения при комнатной температуре высокой спиновой поляризации электронов. Важным шагом в решении этой задачи явилось обнаружение того, что в твердых растворах GaAs, N, при комнатной температуре оптическая спиновая поляризация электронов достигает 90% и сохраняется дольше 1 наносекунды, превышая на порядок время спиновой релаксации свободных электронов. Рекордно высокие значения поляризации и спиновой памяти обусловлены эффектом формирования нелинейной связанной системы свободных и локализованных спинов, в основе которого лежит спин-зависимый захват свободных электронов на глубокие парамагнитные центры и их динамическая поляризация (см. рисунок 4).

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что сверхтонкое взаимодействие электрона, локализованного в GaAs_{1-x}N_x на парамагнитном центре Ga²⁺, с собственным (одним) ядром центра оказывает существенное влияние на спиновую поляризацию локализованных электронов. В частности, при непрерывной оптической накачке в нулевом магнитном поле это приводит к двукратному уменьшению поляризации свободных электронов и интенсивности краевой люминесценции, а также динамической поляризации ядерных спинов. Продольное магнитное поле (геометрия Фарадея) разрывает сверхтонкое взаимодействие и восстанавливает максимальные значения электронной поляризации и интенсивности люминесценции. При этом магнитополевые зависимости сдвинуты относительно нуля магнитного поля на величину ядерного поля (поле Оверхаузера) *B*_N ~ 200 гаусс, которое поляризованные ядра создают на локализованных электронах.

Предсказан новый эффект – в нулевом внешнем магнитном поле сверхтонкое взаимодействие спина электрона, локализованного на центре, с ядром центра приводит к электрон-ядерным спиновым биениям. Этот эффект экспериментально зарегистрирован в виде осцилляций интенсивности краевой люминесценции, возбуждаемой циркулярно-поляризованным зондирующим импульсом при его временной задержке относительно накачивающего импульса (см. рисунок 5) Разработана кинетическая теория спин-зависимой рекомбинации Шокли-Рида-Холла и оптической спиновой ориентации электронов в полупроводнике при



Рисунок 5.

произвольной ориентации внешнего магнитного поля для непрерывного и импульсного фотовозбуждения, которая качественно верно описывает экспериментальные результаты.

Гигантское инжекционное магнитосопротивление в гетероструктурах ферромагнетик / полупроводник.

В современной электронике эффекты магнитосопротивления (GMR, TMR) имеют огромное значение и широкую область применений - они используются в датчиках магнитного поля, в головках для считывания информации в жестких дисках, в биосенсорах, в микроэлектромеханических системах. Одной из актуальных задач является повышение чувствительности магнитных датчиков, что может быть достигнуто за счет использования эффекта гигантского инжекционного магнитосопротивления.

Эффект гигантского инжекционного магнитосопротивления (IMR-эффект) наблюдался в гетероструктурах, содержащих пленки SiO₂ с наночастицами Со, выращенных на подложках n-GaAs, при инжекции электронов в полупроводник. IMR-эффект имеет положительные значения, то есть ток протекающий через



Рисунок 6. ВАХ структуры SiO₂(Co)/GaAs с 71 at.% Со при инжекции электронов в полупроводник при различных значениях магнитного поля. Н параллельно поверхности пленки SiO₂(Co)

гетероструктуру SiO₂(Co)/GaAs уменьшается с ростом магнитного поля, и обладает температурно-пиковым характером. Температурная локализация эффекта зависит от концентрации Со и сдвигается приложенным электрическим полем. Для гетероструктур SiO₂(Co)/GaAs с 71 at.% Со значение коэффициента магнитосопротивления IMR достигает 1000 (105%) при комнатной температуре, что на два-три порядка выше максимальных значений гигантского магнитосопротивления (GMR) в магнитных металлических мультислойных структурах и туннельного магнитосопротивления (TMR) в структурах на основе магнитных туннельных контактов.

Объяснение IMR-эффекта основано на спин-зависимом потенциальном барьере, который образуется в обогащенном слое в полупроводнике вблизи интерфейса, и контролируется магнитным полем путем изменения его высоты и прозрачности. Спин-зависимый



Рисунок 7. Температурные зависимости IMR для структуры SiO₂(Co)/GaAs c x = 71 at.% Со в касательном магнитном поле H = 10 kOe при разных приложенных напряжениях.

потенциальный барьер в обогащенном слое образуется благодаря обменному взаимодействию между электронами обогащенного слоя в GaAs и d-электронами Co. Действие барьера на ток инжекции усиливается лавинным процессом в GaAs и ростом числа электронов на обменно-расщепленных уровнях квантовой ямы обогащенного слоя, которые препятствуют дальнейшей электронной инжекции, и делают гетероструктуры SiO2(Co)/GaAs чрезвычайно чувствительными к действию магнитного поля.

IMR-эффект можно распространить на структуры с другими полупроводниками. Гетероструктуры ферромагнетик/полупроводник с квантовыми ямами, содержащими спин-поляризованные локализованные электроны в полупроводнике около интерфейса, могут рассматриваться как перспективные комнатно-температурные магнитные датчики высокой чувствительности, на основе которых можно создать сенсорные матрицы для визуализации слабых магнитных полей.

Литература:

- V.L. Korenev, M. Salewski, I.A. Akimov, V.F. Sapega, L. Langer, I.V. Kalitukha, J. Debus, R. I. Dzhioev, D. R. Yakovlev, D. Müller, C. Schröder, H. Hövel, G. Karczewski, M. Wiater, T. Wojtowicz, Yu.G. Kusrayev, and M. Bayer// Long-range p-d exchange interaction in a ferromagnet-semiconductor hybrid structure. Nature Physics, 12, 85-91 (2016).
- I. V. Krainov, V. F. Sapega, N. S. Averkiev, G. S. Dimitriev, K. H. Ploog, E. Lahderanta, Manganese spin dephasing mechanisms in ferromagnetic (Ga,Mn)As, Phys. Rev. B, 92, 24 (2015)
- Anna Rodina, and Alexander L. Efros. Magnetic Properties of Nonmagnetic Nanostructures: Dangling Bond Magnetic Polaron in C.S. Nanocrystals. Nano Lett., 15 (6), 4214–4222 (2015)
- Louis Biadala, Elena V. Shornikova, Anna V. Rodina, Dmitri R. Yakovlev, Benjamin Siebers, Tangi Aubert, Michel Nasilowski, Zeger Hens, Benoit Dubertret, Alexander L. Efros & Manfred Bayer. Magnetic polaron on dangling-bond spins in C. S. colloidal nanocrystals, Nature Nanotechnology, 12, 569–574 (2017)
- E. L. Ivchenko, L.A. Bakaleinikov, and V.K. Kalevich, "Spindependent recombination and hyperfine interaction at deep defects", Physical Review B 91, 205202 (2015).
- S. Azaizia, H. Carrère, J. C. Sandoval-Santana, V. G. Ibarra, V. K. Kalevich, E. L. Ivchenko, L. A. Bakaleinikov, X. Marie, T. Amand, A. Kunold, A. Balocchi, "Electron-nuclear coherent spin oscillations probed by the spin-dependent recombination", Physical Review B 97, 155201 (2018).

ОПТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМ ПОРЯДКОМ НАНОСТРУКТУР НА ПИКО- И ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ВРЕМЕНАХ

Базовые подразделения - лаборатории Физики ферроиков и Оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах

Запись и хранение информации на магнитных носителях остается одним из самых востребованных методов, надежным и наименее энергозатратным. В связи с этим большое внимание в современной физике магнетизма уделяется управлению магнитным порядком в материалах и наноструктурах на нанометровых пространственных и субпикосекундных временных масштабах. Попытки решить эту задачу путем применения воздействий на магнитоупорядоченные среды, альтернативным импульсам магнитного поля, привели к появлению целого нового направления в современном магнетизме – фемтомагнетизму [А. Kirilyuk et al., Rev. Mod. Phys. 82, 2731 (2010)]. Одними из основных практических задач в этой области является полностью-оптическое переключение намагниченности за времена порядка или даже короче 1 пикосекунды, а также генерация когерентной магнитной динамики на терагерцовых частотах и субмикронных пространственных масштабах. Для решения этих задач исследователям необходимо ответить на целый ряд фундаментальных вопросов, среди которых:

 Сильнейшим взаимодействием, ответственным за возникновение магнитного порядка, является обменное взаимодействие. Можно ли управлять силой или даже знаком этого взаимодействия на сверхкоротких временах?

 Известно, что в большинстве материалов оптическое излучение не взаимодействует напрямую со спинами, а воздействует преимущественно на электроны в материале. Какие взаимодействия могут служить «посредником» для управления спинами, т.е. намагниченностью, с помощью оптических импульсов?

- Каковы предельно достижимые скорости/частоты отклика намагниченности на лазерный импульс?

Хотя ответы на эти и сопутствующие вопросы получены лишь частично, прорывные экспериментальные и теоретические работы, выполненные, в том числе, при активном участии сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе [1, 2], однозначно показывают, что управление намагниченностью фемтосекундными лазерными импульсами не просто позволяет превзойти скорости управления намагниченностью, достижимые за счет использования импульсов магнитного поля, но и открывает доступ к динамике намагниченности за пределами классического приближения.

Сверхбыстрый оптомагнетизм

В 2005 году исследователи из ФТИ и Университета Радбауд (Нидерланды) и МЭИ (Москва) впервые показали, что циркулярно-поляризованный фемтосекундный лазерный импульс может действовать на магнитоупорядоченный диэлектрик как короткий импульс эффективного магнитного поля, причем направление этого поля задается поляризацией лазерного импульса. В последовавшей серии высокоцитируемых работ [3] было показано, что и линейно-поляризованные импульсы обладают таким же свойством, а в основе



Рисунок 1. Сверхбыстрый обратный эффект Фарадея (слева): циркулярно-поляризованный 100-фс лазерный импульс действует как импульс эффективного магнитного поля ±δΗ и запускает прецессию намагниченности в ортоферрите DyFeO₃. Сверхбыстрый обратный эффект Котона-Мутона (справа): линейно-поляризованный 100-фс лазерный импульс запускает прецессию намагниченности в борате железа FeBO₃.

этих сверхбыстрых оптомагнитных явлений лежит импульсное стимулированное комбинационное рассеяние. За счет таких явлений фемтосекундный лазерный импульс может эффективно возбуждать прецессию намагниченности в диэлектриках с различными магнитными структурами без поглощения [4], что является очень важным свойством, открывающим возможность управлять магнитным порядком с минимальными потерями на нагрев образца.

Лазерно-индуцированное управление обменным взаимодействием *и* субпикосекундная динамика магнитного порядка

С микроскопической точки зрения в основе сверхбыстрых оптомагнитных эффектов, описанных выше, лежит спин-орбитальное взаимодействие, которое делает возможным отклик намагниченности на воздействие электрического поля оптического импульса. Однако наиболее прямым способом воздействия на магнитную систему является, очевидно, лазерно-индуцированное изменение обменного взаимодействия. В работе [1], выполненной при участии ФТИ, было впервые экспериментально обнаружено, что электрическое поле лазерного импульса действительно может модулировать обменное взаимодействие за счет обратного магниторефрактивного эффекта. В результате изучения откликов семейства слабых ферромагнетиков – оксидов железа, на воздействие коротких лазерных импульсов, в работе [1] было показано, что индуцированная динамика намагниченности в этих материалах является результатом быстрого, субпикосекундного, изменения изотропного и/или анизотропного вкладов в обменное взаимодействие.

Интерес к лазерно-индуцированному изменению обменного взаимодействия обусловлен, в частности, тем, что таким образом можно индуцировать динамику намагниченности с субпикосекундными характерными временами. Именно это и было продемонстрировано в работе [2], где впервые было реализовано возбуждение и управление когерентной двухмагнонной модой с периодом ~50 фс в антиферромагнетике. Ключом к реализации такого возбуждения стало использование очень коротких лазерных импульсов длительность менее 20 фс.



Рисунок 2. Двухмагнонная мода и макроскопическая модуляция длины антиферромагнитного вектора L в антиферромагнетике KNiF₃, индуцированные 20-фс лазерным импульсом.

Оптическая модуляция магнитной анизотропии

Сверхбыстрые оптомагнитные эффекты и оптическая модуляция обменного взаимодействия накладывают существенные ограничения на класс материалов, в которых эти явления дают значительный вклад в управление магнитным порядком. Наиболее же универсальным подходом к управлению магнитным порядком является, пожалуй, сверхбыстрое изменение магнитной анизотропией под действием коротких лазерных (и некоторых других типов) импульсов. Магнитная анизотропия, т.е. наличие в кристалле или наноструктуре направлений, вдоль которых намагниченность стремится ориентироваться, присуще всем магнитным материалам. Быстрое лазерно-индуцированное изменение магнитной анизотропии может запустить прецессионное движение намагниченности, в том числе с большой амплитудой, и даже изменить ее ориентацию [A. Stupakiewicz et al., Nature (London) 542, 71 (2017)].

В ФТИ в последние несколько лет сделан ряд важных экспериментальных работ, направленных на



Рисунок 3. Пикосекундное переключение намагниченности в редкоземельном ортоферрите (Sm,Pr)FeO₃ за счет лазерноиндуцированного спин-ориентационного перехода и сверхбыстрого обратного эффекта Фарадея. Внизу представлена фазовая диаграмма, показывающая направление переключения намагниченности в зависомсти от начальной температуры образца и плотности энергии в лазерном импульсе.

определение возможностей и ограничений по сверхбыстрому лазерно-индуцированному изменению магнитной анизотропии в тонких пленках и наноструктурах. Так, в работе [5] было показано, что прецессия намагниченности в тонких пленках ферритов-гранатов – материалов, играющих важную роль в СВЧ технологиях и магнонике, может быть индуцирована за счет лазерно-индуцированного нагрева решетки, приводящего к пикосекундному изменению магнитной анизотропии.

Наибольший интерес такой эффект представляет в материалах, в которых при оптически-индуцированном изменении температуры могут возникать спин-оринтационные переходы, т.е. резкое изменение направлений осей анизотропии. В работе такие лазерно-индуцированные спин-ориентационные переходы в комбинации со сверхбыстрыми обратными оптомагнитными эффектами были использованы для реализации переключения намагниченности диэлектриков на временах порядка нескольких пикосекунд.



Рисунок 4. Лазерно-индуцированная генерация долгоживущей прецессии намагниченности в нанорешетке галфенола за счет магнитоупругого взаимодействия. Экспериментальные кривые показывают увеличение времени жизни прецессии при достижении магнитоупругого резонанса во внешнем магнитном поле 175 мТ. Вставка иллюстрирует прецессию намагниченности **М** и индуцированное переменное поле **В**^{ас} вблизи нанорешетки [7]

Также на управлении магнитной анизотропией основано особое направление исследований в фемтомагнетизме - пикосекундная магнитоакустика, т.е. изучение отклика намагниченности на лазерно-индуцированную динамическую деформацию, которая в ряде случаев может быть представлена как импульс когерентных акустических фононов. Здесь лазерно-индуцированные динамические деформации модифицируют анизотропию материала за счет эффекта обратной магнитострикции [6, 7]. В пикосекундной магнитоакустике особый интерес представляют явления, возникающие при достижении резонанса между магнитными и акустическими возбуждениями, для чего создаются специальные пространственно-профилированные структуры. В частности, недавно в работе [7] было осуществлено возбуждение долгоживущей прецессии намагниченности в нанорешетке на основе ферромагнитного металла – галфенола за счет магнитоакустического взаимодействия. Следует особо отметить, что таким образом может быть реализована генерация переменных магнитных полей, локализованных на нанометровых масштабах и имеющих субтерагерцовые частоты.

Литература:

- R. V. Mikhaylovskiy, E. Hendry, A. Secchi, J. H. Mentink, M. Eckstein, A. Wu, R. V. Pisarev, V. V. Kruglyak, M. I. Katsnelson, Th. Rasing, A.V. Kimel, Ultrafast optical modification of exchange interactions in iron oxides, Nature Coomun. 6, 8190 (2015).
- D. Bossini, S. Dal Conte, Y. Hashimoto, A. Secchi, R.V. Pisarev, Th. Rasing, G. Cerullo, A.V. Kimel, Macrospin dynamics in antiferromagnets triggered by sub-20 femtosecond injection of nanomagnons, Nature Commun. 7, 10645 (2016).
- А. М. Калашникова, А. В. Кимель, Р. В. Писарев, Сверхбыстрый оптомагнетизм, Усп. Физ. Наук 185, 1064 (2015).
- D. Bossini, A. M. Kalashnikova, R. V. Pisarev, Th. Rasing, and A. V. Kimel, Controlling coherent and incoherent spin dynamics by steering the photoinduced energy flow, Phys. Rev. B 89, 060405(R) (2014).
- L.A. Shelukhin, V. V. Pavlov, P.A. Usachev, P. Yu. Shamray, R. V. Pisarev, and A. M. Kalashnikova, Ultrafast laser-induced changes of the magnetic anisotropy in a low-symmetry iron garnet film, Phys. Rev. B 97, 014422 (2018).
- V. N. Kats, T. L. Linnik, A. S. Salasyuk, A. W. Rushforth, M. Wang, P. Wadley, A. V. Akimov, S. A. Cavill, V. Holy, A. M. Kalashnikova, and A. V. Scherbakov, Ultrafast changes of magnetic anisotropy driven by laser-generated coherent and noncoherent phonons in metallic films, Phys. Rev. B 93, 214422 (2016).
- A. S. Salasyuk, A. V. Rudkovskaya, A. P. Danilov, B.A. Glavin, S. M. Kukhtaruk, M. Wang, A. W. Rushforth, P.A. Nekludova, S. V. Sokolov, A.A. Elistratov, D. R. Yakovlev, M. Bayer, A. V. Akimov, and A. V. Scherbakov, Generation of a localized microwave magnetic field by coherent phonons in a ferromagnetic nanograting, Phys. Rev. B 97, 060404(R) (2018).

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА, ТГЦ И СВЧ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ФОТОНИКА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (AL,GA)N

Базовое подразделение – лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур

Актуальной и быстро развивающейся областью полупроводниковой физики и технологии является развитие ультрафиолетовой (УФ) фотоники для диапазона длин волн λ =210-360 нм на основе широкозонных нитридных соединений третьей группы $AI_xGa_{1,x}N$ (x=0-1) с шириной запрещенной зоны, непрерывно регулируемой в диапазоне 3.4 — 6.1 эВ. УФ фотодетекторы необходимы для солнечно-слепой фотосенсорики (λ <290 нм), а источники УФ-излучения найдут широкое применение в приборах оптической дезинфекции воды/воздуха/пищи, УФ фототехнологиях, УФ оптической спектроскопии для детектирования различных биологических веществ, медицине, системах скрытой помехозащищенной связи и др. Приборы на основе AlGaN гетероструктур отличаются компактностью, низким энергопотреблением, долгим сроком службы, а также высокими показателями тепловой, радиационной и химической стойкости.

С середины 90-х годов в лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур были начаты исследования свойств слоев и наногетероструктур на основе широкозонных нитридных соединений третьей группы (Al,Ga,In)N, а также развитие основ технологии их эпитаксиального роста с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ). Важное место в этих исследованиях занимает развитие УФ фотоники на основе (Al,Ga)N соединений, имеющей множество различных применений, перечисленных выше.

Среди серьезных проблем при создании излучателей и детекторов глубокого УФ диапазона на основе вюртцитных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) (Al,Ga)N, выращиваемых на подложках с-Al₂O₃, необходимо выделить следующие. Во-первых, это высокая плотность структурных дефектов за счет рассогласования параметров кристаллической решетки. Во-вторых, сильное встроенное поляризационное поле, возникающее в КЯ, индуцирует квантоворазмерный эффект Штарка с сильным электронно-дырочным разделением внутри КЯ, что приводит к снижению внутренней квантовой эффективности и значительному «красному» сдвигу длины волны излучения. В-третьих, сложная структура валентной зоны твердых растворов Al Ga, N претерпевает перестройку валентной зоны при х~0.25, когда отщепленная кристаллическим полем валентная подзона становится верхней. Это приводит к TM (Ellc-axis) поляризации межзонного излучения, обуславливающей предельно низкую эффективность вывода излучения через с-ориентированную поверхность, по сравнению с ТЕ поляризованным УФ излучением, доминирующем для твердых растворов с малым х, где верхней валентной подзоной является подзона тяжелых дырок. Наконец, низкая эффективность и выходная мощность излучения светодиодов среднего УФ диапазона обусловлена также низкой р-проводимостью слоев с x>0.4.

Были теоретически и экспериментально изучены структурные, оптические и электрофизические свойства Al_xGa_{1-x}N(x=0-1) слоев и наногетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N (*x*,*y*=0-1). Исследования различных явлений, определяющих эффективность излучательной рекомбинации и



Рисунок 1. Схема ростовой камеры установки ПА МПЭ Compact 21T (Riber) (a) и ее фото (b).

транспорт носителей в этих слоях и структурах, позволили определить оптимальные конструкции и параметры различных типов УФ фотодетекторов, а также источников спонтанного и лазерного УФ излучения.

В технологических исследованиях используется современная установка молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (ПА МПЭ) Compact 21T (Riber), показанная на Рис.1, которая оборудована как стандартными методиками in situ контроля роста с помощью дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ) и лазерной рефлектометрии (ЛР), так и многолучевым оптическим измерителем напряжений (МОИН) оригинальной разработки. Развитие таких импульсных методов ПА МПЭ, как эпитаксия с повышенной миграцией адатомов и металл-модулированная эпитаксия в металл-обогащенных стехиометрических условиях, решили проблему повышения поверхностной подвижности адатомов в условиях низкотемпературной ПА МПЭ (T<800°C). Применение этих методов позволило снизить в буферных слоях AIN, выращиваемых на рассогласованных подложках с-Al₂O₃, плотность прорастающих дислокаций ниже 10⁹ см⁻² и добиться при росте твердых растворов Al Ga, N (x=0-1) контролируемого варьирования морфологии

поверхности от трехмерной (наноколончатой) до атомарно-гладкой (с шероховатостью <0.4 нм на площади 2×2мкм²).

Для формирования гетероструктур с КЯ было предложено использовать субмонослойную дискретную эпитаксию (СДЭ) [1]. Важно, что уникальные возможности ПА МПЭ по сверхбыстрому переключению ростовых потоков атомов III-группы и



Рисунок 2. Спектральные чувствительности двух фото-катодов на основе AlGaN:Mg/AlN/с-Al₂O₃ гетероструктур. Вставки демонстрируют внешний вид блока фотокатода (верхняя) и изображение его экрана при однородной засветке УФ излучением (нижняя).



плазменно-активированного азота (<0.5 с), а также эпитаксиальному росту слоев (AI,Ga)N при низких температурах подложки (до ~700°С) в металл-обогащенных стехиометрических условиях позволили достичь предельно тонких КЯ - вплоть до одного монослоя (MC) толщиной 0.25 нм и менее. Кроме того, были разработаны технологии *n*- и *p*-легирования слоев AI_xGa₁. _xN (*x*=0-0.8) в процессе ПА МПЭ с использованием Si и Mg, включая методы поляризационного *p*-легирования AIGaN:Mg слоев переменного состава и легирования сверхрешеточных структур N×{AIN/GaN:Mg}. И, наконец, были развиты посторостовые технологии формирования топологии элементов приборов полупроводниковой УФ фотоники и контактов к ним.

Описанные выше научно-технологические основы УФ фотоники позволили изготовить в качестве солнечно-слепых фотодетекторов фотокатоды с отрицательным сродством электронов на основе гетероструктур AlGaN:Mg/AlN/c-Al₂O₃, которые продемонстрировали рекордную чувствительность 27 мА/Вт при λ =228 нм и длинноволновой границе чувствительности λ ~260 нм (Рис. 2). Кроме того, были изготовлены *p-i-n* фотодиоды (Рис. 3) и фотодиоды Шоттки с отношением



Рисунок 4 - Спектр катодолюминесценции (300К) гетероструктуры с МКЯ {GaN(1.5MC)/AIN(5нм)}×360. На вставке показаны схема этой гетероструктуры и HAADF STEM изображение одной КЯ с номинальной толщиной 1.5 MC.

чувствительностей в УФ и видимом диапазонах >10³ и максимальными значениями чувствительности 36 и 24 мА/Вт (λ~270 нм), соответственно.

Для разработки конструкций мощных источников спонтанного УФ излучения с электронно-лучевой накачкой (что позволяет обойти проблему слабой р-проводимости слоев AlGaN с x>0.3) были выращены и исследованы гетероструктуры с одиночными и множественными КЯ N×{GaN/AIN} (N=1-360) с различными толщинами сверхтонких КЯ (t) и барьеров между ними (d). Наблюдавшееся существенное повышение эффективности излучательной рекомбинации при снижении толщин КЯ от нескольких нанометров до значений t<1 нм (~1-2MC) было объяснено лучшим перекрытием волновых функций электрона и дырки в таких ультратонких КЯ и их эффективной локализацией в квантовых нанодисках, образующихся при специфической релаксации упругих напряжений. Такая морфология КЯ обусловила нулевые средние напряжения во время роста структур с множественными ультратонкими (t<1 нм) изолированными КЯ (d≥3.5 нм), что позволило увеличить их число до нескольких сотен. МКЯ структуры с оптимальной толщиной ям (t~1.5MC) и максимальным



Рисунок 5. Рассчитанная зависимость длины волны излучения КЯ Al_xGa_{1,x}N/Al_yGa_{1,y}N, (x=0-0.5, y=0-1) с толщиной ямы 1.5 нм (а). Нормированные спектры интенсивности электролюминесценции УФ светодиодов с КЯ AlxGa_{1,x}N/Al_yGa_{1,y}N, (x=0.2-0.4, y=0.55-0.8), сформированными с помощью СДЭ. Вставка показывает HAADF STEM изображение гетероструктуры с 3 КЯ{Al_{0,4}Ga_{0,6}N/Al_{0,7}Ga_{0,3}N}, использовавшейся в одном из светодиодов с λ=270 нм (b).

их количеством (*N*=360 при *d*>5нм) продемонстрировали УФ излучение с λ=235 нм и максимальной импульсной (постоянной) выходной оптической мощностью до 150(28) мВт при накачке электронным пучком с энергией 20(15) кэВ и током 1(0.45) мА, соответственно (Рис.4) [2].

При этом была достигнута рекордная эффективность 0.75% для полупроводниковых источников глубокого УФ излучения. Для сравнения, лучшая эффективность подобных источников, полученных в Palo Alto RC при большей λ=246 нм составила 0.44%.

УФ светодиоды (СД), излучающие в диапазоне λ=260-370 нм с максимальной выходной мощностью до ~0.6 мВт (λ=320 нм) были изготовлены на основе гетероструктур AlGaN/AIN/c-Al₂O₃ с активной областью в виде МКЯ Al₂Ga₁₂N/Al₂Ga₁₂N, сформированных СДЭ (Рис.5).

Для изготовления этих СД использовались технологии реактивного ионно-плазменного травления, вакуумного осаждения металлических контактов (Ti/Al/Ni/ Au etc.) и их быстрого термического отжига.

И, наконец, с использованием метода СДЭ была



Рисунок 6. Спектры краевой фотолюминесценции гетероструктур с одиночными КЯ АІ, Ga_{1-x}N/AI, Ga_{1-y}N, (x=0.5-0.8, y-x=0.1) с номинальной толщиной ~2.5 нм. Вставки показывают схему гетероструктур и HAADF STEM изображение одной из КЯ.

разработана технология ПА МПЭ на подложках с-сапфира гетероструктур с одиночными КЯ Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-x} N для получения оптически накачиваемого лазерного УФ излучения в диапазоне λ=258-303 нм с минимальной пороговой плотностью мощности ~150кВт/см² (λ=290нм) [3]. При этом были развиты методы контроля морфологии КЯ на субмонослойном уровне (Рис.6).

Высокая эффективность излучательной рекомбинации в субмонослойных КЯ подтверждается тем, что достигнутые для структур с такими ямами пороговые мощности возбуждения лазерного излучения сопоставимы с уровнем, полученным для структур с существенно меньшей концентрацией дефектов, которые были выращены с помощью технологии ГФЭ МО на дорогих монокристаллических подложках AIN (HEXATECH, CША).

Полученные результаты по многим параметрам имеют мировой приоритет и соответствуют лучшим результатам для подобных структур [4].

Литература:

- V. N. Jmerik, E. V. Lutsenko, S. V. Ivanov, Plasma-assisted molecular beam epitaxy of AlGaN heterostructures for deep-ultraviolet optically pumped lasers, Phys. Stat. Sol. A 210, 439-450 (2013).
- V. N. Jmerik, D. V. Nechaev, A.A. Toropov, E.A. Evropeitsev, V. I. Kozlovsky, V. P. Martovitsky, S. Rouvimov, and S. V. Ivanov High-efficiency e-beam-pumped sub-240 nm UV emitters based on ultra-thin GaN/AIN multiple quantum wells grown by plasmaassisted MBE on c-Al₂O₄, Appl. Phys. Express (2018).
- 3. S. V. Ivanov, D. V. Nechaev, A. A. Sitnikova, V. V. Ratnikov,

M.A. Yagovkina, N.V. Rzheutskii,

E. V. Lutsenko, and V. N. Jmerik, Plasma assisted molecular beam epitaxy of (AlGa)N layers and quantum well structures for optically pumped mid-UV lasers on c-Al₂O₃, Semicond. Sci. Technol. 29 (2014) 084008 (приглашенная статья в тематический выпуск по УФ СД, ред. Н. Amano et al.)

 V. N. Jmerik, D. V. Nechaev, S. V. Ivanov, Plasma–assisted MBE of (Al,Ga)N layers and heterostructures in «Molecular Beam Epitaxy: From Research to Mass Production», Ed. M. Henini, Elsevier (2018) p.788.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ КОНВЕРТЕРЫ А²В⁶/А³N ЗЕЛЕНОГО И ЖЕЛТОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА (520-590 HM)

Базовое подразделение – лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработаны полупроводниковые лазеры видимого спектрального диапазона (530-590 нм). На основе наногетероструктур полупроводников А²В⁶, накачиваемых лазерным диодом (ЛД) на основе InGaN, созданы оригинальные конструкция и технология молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) компактных инжекционных лазерных конвертеров, излучающих в зеленом и зелено-желтом спектральных диапазонах (530-560 нм). Данные устройства могут быть востребованы для использования в системах проекционного лазерного телевидения, лазерной локации и навигации, для медицинских применений и др.

Несмотря на существенный прогресс в разработке технологии зеленых лазерных диодов на основе нитридов III группы (InGaN), достигнутый в последние несколько лет, их рабочая длина волны не превышает 535 нм, вследствие резкого снижения кристаллического совершенства гетероструктур A3N, обогащенных In. Для расширения рабочего диапазона полупроводниковых лазеров в истинно зеленый и желтый диапазоны спектра (530-590 нм), в Институте разработана технология получения методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs и дизайн многослойных лазерных наногетероструктур широкозонных полупроводниковых соединений А²В⁶ с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) [1]. В связи с тем, что малые времена жизни инжекционных А²В⁶ лазеров определяются процессами т. н. медленной





Рисунок 2. Схематическое изображение структуры A²B⁶/ InGaN инжекционного лазерного конвертера (ИЛК).

деградации, связанной с нестабильностью азотного акцептора, основные усилия были сфокусированы на создании лазеров с альтернативной (оптической или электронно-лучевой) накачкой, на основе нелегированных гетероструктур A2B6, демонстрируюших существенно лучшую деградационную стабильность. Создана термодинамическая феноменологическая модель технологии МПЭ соединений A²B⁶, обеспечивающая количественное описание технологических процессов. Для лазеров зеленого диапазона с активной областью на основе KT CdSe/ZnSe достигнуты рекордные значения пороговой плотности мощности при оптической накачке (T=300K) на уровне около I_{thr}=0.8 кВт/см² (эквивалентно 150-200 А/см² для инжекционной накачки).

С целью расширения спектрального диапазона в желто-оранжевую область разработана конструкция и реализованы A²B⁶ лазерные гетероструктуры с активной областью на основе CdSe KT с номинальной толшиной слоя CdSe *w*~3.0 монослоя (MC), асимметрично вставленных внутри напряженной KЯ ZnCdSe/ZnSe толщиной 2-3 нм и с содержанием Cd до x~0.5 (Рис. 1).

В этом случае продемонстрирована генерация (300К) при оптической накачке на рекордно большой длине волны λ=593 нм при рекордно низкой *I*_{thr}~2.5 кВт/ см² для полупроводниковых лазеров данного диапазона. На базе данных наногетероструктур при тесном взаимодействии с учеными Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси изготовлены импульсные инжекционные A²B⁶/InGaN лазерные конвертеры (ИЛК), в которых активная гетероструктура A²B⁶ накачивается излучением InGaN лазерного диода (ЛД), сфокусированным системой микролинз (Рис. 2).

При этом вариация состава и конструкции активной области гетероструктуры А²В⁶ позволяет получать лазерное излучение на любой заданной длине волны (520-590нм). Значения квантовой эффективности



Рисунок 3. Пороговая характеристика (a) и зависимости Pout и ηq (b) желто-оранжевого (λ=590 нм) ИЛК на основе лазерной гетероструктуры с асимметричным дизайном активной области КТ в КЯ.

Полупроводниковая оптоэлектроника, ТГц и СВЧ



Рисунок 4. Фотография компактного ИЛК А²B⁶/A³N зеленого диапазона (λ=550 нм) (а). Зависимость Р_{ои} и η_q зеленого (λ=541 нм) микрочип-ИЛК от мощности накачки синего импульсного InGaN ЛД (λ=440нм, т_л=4нс) (b).

конверсии в зеленом (520–550 нм) спектральном диапазоне и импульсной выходной мощности при накачке промышленным InGaN ЛД (λехс=416–440 нм) составили qq=20–30% и Pout≤5 Вт, соответственно. Необходимо отметить, что КПД «от розетки» зеленых A2B6/ InGaN ИЛК (~7%) сравнимо со значениями КПД прямо-излучающих зеленых InGaN ЛД и ИК ЛД с генерацией второй гармоники. В случае ИЛК, излучающего в желто-оранжевом спектральном диапазоне (λ=590 нм), максимальное полученное значение Pout=0.7 Вт при qq=18.4% (Рис. 3). Разработанные устройства могут оказаться востребованы при производстве СМҮК проекторов и для ряда медицинских применений – в частности, в офтальмологии и при лечении сосудистых заболеваний кожи.

Для создания на базе A²B⁶/InGaN ИЛК коммерческих приборов в последние годы основные усилия были направлены на изготовление ИЛК зеленого и зелено-желтого (520–560 нм) диапазона в конфигурации «микрочип», т.е. в стандартном корпусе TO-18 диаметром 5.6 мм (Рис. 4а). Компактные полупроводниковые ИЛК предназначены для использования в пико-проекторах для смартфонов и видеокамер, системах лазерного телевидения и др. Прогресс в изготовлении таких устройств во многом определяется появлением на рынке доступных мощных импульсных InGaN ЛД. Длина резонатора A^2B^6 лазера (L_{cav} =100–130 µm) и размеры фокусирующей микролинзы обеспечивают минимальные значения пороговой мощности лазерной генерации. На сегодняшний день максимальные достигнутые значения параметров микрочип-ИЛК (λ =541 нм) составляют P_{out} ~1.5 Вт (тр=4 нс, f=1 кГц) при η_a =15% (Рис. 4b).

Полученные результаты по многим аспектам имеют мировой приоритет и соответствуют лучшим результатам для подобных структур. Они регулярно докладывались на основных тематических международных и российских конференциях, были опубликованы в ведущих международных научных журналах, а также обобщены в виде глав в коллективной монографии под редакцией М. Хенини (М.Henini) «Молекулярно-пучковая эпитаксия: от исследований к производству» (Elsevier) в 1 (2013) [1] и 2 (2018) изданиях.

Литература:

 S. V. Ivanov, S.V. Sorokin, I.V. Sedova. Molecular beam epitaxy of wide-gap II–VI laser heterostructures. In: Henini M, editor. Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production. Elsevier Inc., 2013. p. 611–630.

ИНФРАКРАСНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А³В⁵

Базовое подразделение – лаборатория Инфракрасной оптоэлектроники

Инфракрасная оптоэлектроника на основе наногетероструктур полупроводников А³В⁵ интенсивно развивается во многих мировых научных центрах в связи с появлением новых актуальных задач в области экологии, медицины, безопасности, информационных технологий и др. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся работы по созданию и исследованию источников спонтанного и когерентного излучения, а также фотоприемников для ближнего и среднего ИК диапазона.

Основные направления отечественной полупроводниковой электроники и инфракрасной оптоэлектроники на основе полупроводников А³В⁵ были заложены в Институте в 1950-1975 гг. в лаборатории Д.Н. Наследова. В настоящее время в лаборатории Инфракрасной оптоэлектроники Института разрабатывается технология выращивания гетероструктур, в том числе пониженной размерности (2D-0D), на основе узкозонных материалов (GaSb, InAs, InSb) методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и создаются новые оптоэлектронные приборы.

В лаборатории были впервые экспериментально исследованы уникальные свойства разъединенных гетеропереходов в системе твердых растворов GalnAsSb, изопериодных с подложками InAs и GaSb, и установлены их зонные энергетические диаграммы. На примере системы GalnAsSb/InAs(GaSb) были изучены условия перехода от ступенчатого гетероперехода к разъединенному в зависимости от состава твердых растворов и температуры. Наиболее интересным обнаруженным эффектом было обнаружение двумерного электронного полуметаллического канала с высокой подвижностью носителей 50000-70000 см²/В×с при температуре 77К в изотипной p-GalnAsSb/ p-InAs (x=0.06-0.09). Понимание необычного поведения носителей на гетерогранице II типа (см. рисунок 1) стимулировало создание целого класса новых оптоэлектронных приборов для среднего ИК- диапазона.

Так, был впервые предложен и реализован оригинальный туннельно-инжекционный лазер с разъединенным гетеропереходом II типа p-GalnAsSb/n-InGaAsSb (см. рисунок 2).



Рисунок 1. Зонная энергетическая диаграмма разъединенного гетероперехода II типа.



Рисунок 2 - Спектры спонтанного и когерентного излучения лазерной структуры с разъединенным гетеропереходом II типа в активной области.



Рисунок 3. Порог чувствительности в зависимости от коэффициента умножения для фотоприемного модуля на основе: 1 – Ge ЛФД; 2 – GalnAsSb/GaAl(As)Sb ЛФД.

На основе пионерских исследований гетеропереходов II типа в системах GalnAsSb/GaAlAsSb, GalnAsSb/ InAs (GaSb), InAs/InAsSbP были созданы высокоэффективные светодиоды для областей спектра 1.6-2.4 и 3.0-4.8 мкм. Разработана технология наращивания методом МОГФЭ эпитаксиальных слоев предельного состава многокомпонентных твердых растворов в системе In-As-Sb-Р при низких температурах роста (T<520 ^оС) в условиях атмосферного давления, а также технология получения узкозонных наногетероструктур с объектами пониженной размерности 0D-1D (квантовые штрихи, квантовые точки и др.) в системах твердых растворов InAsSbP и GaInAsSb. Впервые получены слои самоорганизующихся квантовых точек InSb на поверхности матрицы GalnAsSb. В гетероструктурах с квантовыми штрихами InSb в матрице InAs впервые получена электролюминесценция в диапазоне длин волн 3-4 мкм при комнатной температуре.

В узкозонных светоизлучающих структурах InAs/ InAsSbP исследован эффект отрицательной люминесценции, обусловленный экстракцией носителей заряда из активной области структуры при обратном смещении. Этот эффект был положен в основу создания сверхярких ИК светодиодов для нового поколения



Рисунок 4. СЭМ-изображение мезаструктуры быстродействующего фотоприемника с мостиковым контактом для спектрального диапазона 1.15÷2.40 мкм

оптико-акустических анализаторов.

С началом разработки волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и появлением эффективных полупроводниковых лазеров в мире возникла необходимость создания быстродействующих фотодиодов с низким уровнем избыточных шумов. Теоретические работы в сочетании с проведенными экспериментальными исследованиями коэффициентов ударной ионизации обширного класса полупроводников (InAs, InAsSb, GaSb, GalnSb, GaAsSb, GaAlSb, InGaAs, InGaAsP) заложили основы создания малошумящих лавинных фотодиодов (ЛФД) с большим отношением коэффициентов ионизации дырок и электронов. Впервые была разработана технология создания быстродействующих малошумящих ЛФД для диапазона длин волн 1.6-2.4 мкм на основе GaSb с разделенными областями поглощения (GalnAsSb) и умножения (область сильного поля в Al_xGa_{1-x}Sb p-n переходе «резонансного состава», x=0.04-0.06, при этом ∆/Е_а ~1.04). В этих приборах достигнуты коэффициент умножения М=20÷30 на длине волны 2 мкм, отношение коэффициентов ионизации дырок и электронов ~30 и сверхнизкий коэффициент избыточного шума ~1.6 (при M=10). Модуль с GaSb/ GalnAsSb ЛФД был испытан в условиях работы ВОЛС


Рисунок 5. Спектр электролюминесценции гетероструктуры n-GaSb/n-InGaAsSb/p-AlGaAsSb с высоким потенциальным барьером при комнатной температуре.

на длине волны 1.55 мкм при скоростях передачи информации 0.5÷1.0 ГБит/с и показал чувствительность 42.3 дБм при M=34÷39, что выше, чем порог фотоприемного модуля с германиевым лавинным фотодиодом (см. рисунок 3). Созданные ЛФД перспективны для лазерной дальнометрии и локации, гетеродинного детектирования в системах телекоммуникаций III поколения и информационных технологий.

На основе легирования материалов GaSb редкоземельными элементами была разработана технология получения низкой концентрации носителей (менее 10¹⁶ см⁻³) в активной области p-i-n фотодиодов, в результате чего созданы первые GaInAsSb/GaAIAsSb фотодиоды (см. рисунок 4) с быстродействием 100-200 пс и полосой пропускания 2-5 ГГц, превосходящие по быстродействию зарубежные аналоги.

Несколько лет назад была обнаружена суперлинейная люминесценция и степенное возрастание оптической мощности от тока накачки в спектральном диапазоне 2–3 мкм при T=77-300К как в объемных гетероструктурах II типа, с высоким потенциальным барьером GaSb/InGaAsSb/AlGaAsSb (см. рисунки 5 и 6), так и в наноструктурах с глубокой квантовой ямой Al(As) Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16} (см. рисунки 7 и 8), выращенных методом МОГФЭ на подложках n-GaSb:Те. Это явление обусловлено вкладом в излучательную рекомбинацию



Рисунок 6. Температурная зависимость мощности излучения длинноволновой E1 и коротковолновой E2 компонент спектра электролюминесценции гетероструктуры n-GaSb/n-InGaAsSb/p-AlGaAsSb с высоким потенциальным барьером.



Рисунок 7. Спектры электролюминесценции наноструктуры n-GaSb/ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb/p-GaSb с глубокой квантовой ямой.





Рисунок 9. Изображение бокового вида мезы дискового WGM-лазера, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

добавочных электронно-дырочных пар, созданных за счет ударной ионизации горячими электронами, разогретыми на скачке потенциала на гетерогранице, а также уменьшением ширины запрещенной зоны узкозонной области и пороговой энергии ионизации с температурой. Обнаруженный эффект может быть использован для повышения квантовой эффективности полупроводниковых структур, а также для расширения интервала рабочих температур светоизлучающих диодов среднего ИК-диапазона.

В лаборатории совместно с французскими коллегами из Университета г. Монпелье методом МПЭ были разработаны первые лазеры на модах шепчущей галереи (WGM) на основе GaSb (λ =2.4 мкм), работающие при комнатной температуре. Сотрудниками лаборатории была разработана технология формирования резонаторов выпуклой формы на основе наногетероструктур GaInAsSb/GaAIAsSb и InAsSb/InAsSbP и созданы дисковые лазеры для спектрального диапазона 2–4 мкм. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что полупроводниковые лазеры с усеченным дисковым резонатором (полдиска) имеют такой же спектр излучения как полный дисковый лазер. Такие лазеры обладают уникальным свойством – возможностью плавной перестройки частоты



Рисунок 10. Лабораторный макет датчика для определения концентрации воды в водонефтяной эмульсии методом светопропускания.

генерируемого лазерного излучения.

Фундаментальные исследования и технологические разработки Института в области ИК оптоэлектроники позволили создать различные сенсоры на основе оптоэлектронных пар, работающие в диапазоне длин волн 1.6÷5.0 мкм, для экологического мониторинга и газового анализа, в том числе:

- сенсоры углекислого газа, применяемые для контроля за выбросами CO₂ – основного фактора глобального изменения климата;
- сенсоры метана для контроля утечек метана (природного газа) в быту, промышленности, на газопроводах, в шахтах;
- сенсоры влажности и содержания воды для измерения количества воды в нефтепродуктах (см. рисунок 10), влажности бумаги, зерна и др.;
- оптоэлектронные приборы медицинской диагностики для анализа концентрации углекислого газа, ацетона и других веществ в выдыхаемом воздухе для неинвазивного контроля содержания глюкозы и других органических веществ в крови, лимфе и тканях.

Разработки ФТИ им. А. Ф. Иоффе были внедрены в мелкосерийное производство оптоэлектронных приборов в отечественных инновационных компаниях.

Литература:

- Chapter 5. Superlinear Luminescence and Enhancement of Optical Power in GaSb-based Heterostructures with High Conduction-Band Offsets and Nanostructures with Deep Quantum Wells Mikhailova M.P., Danilov L.V., Kalinina K.V., Ivanov E.V., Stoyanov N.D., Zegrya G.G., Yakovlev Yu.P., Hospodkova A., Pangrac J., Zikova M., Hulicius E. В книге (сборнике): The Wonder of Nanotechnology: Quantum Optoelectronic Devices and Applications (893 стр.) страницы: 105-131. 2013 SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, USA ISBN: 978-0-819-49596-9
- И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. «Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2–2.4мкм на основе гетероструктур GaSb/GalnAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2–5ГГц». Физика и техника полупроводников, 2013, том 47, вып. 8, 1109-1115.
- Вертикальный транспорт в гетеропереходах II типа с композитными квантовыми ямами InAs/GaSb/AISb в сильном

магнитном поле. Михайлова М.П., Березовец В.А., Парфеньев Р.В., Данилов Л.В., Сафончик М.О., Hospodkova A., Pangrac J., Hulicius E. 2017, ФТП, т.51, 10, страницы: 1393-1399

- Электролюминесцентные свойства лазера на модах шепчущей галереи со сдвоенными резонаторами. Именков А.Н., Гребенщикова Е.А., Шерстнев В.В., Леонидов А.А., Ильинская Н.Д., Серебренникова О.Ю., Teissier R., Баранов А.Н., Яковлев Ю.П. 2014, ФТП, т.48, 10, страницы: 1434-1438
- Коллективные моды в сдвоенных полупроводниковых дисковых лазерах на модах шепчущей галереи. Ройз М.А., Баранов А.Н., Именков А.Н., Буренина Д.С., Пивоварова А.А., Монахов А.М., Гребенщикова Е.А., Яковлев Ю.П. 2017, ФТП, т.51, 9, страницы: 1273-1277.
- Эффект увеличения фотопроводимости в гетероструктуре II типа n-GaSb/InAs/p-GaSb с одиночной квантовой ямой. Михайлова М.П., Андреев И.А., Коновалов Г.Г., Данилов Л.В., Иванов Э.В., Куницына Е.В., Ильинская Н.Д., Левин Р.В., Пушный Б.В., Яковлев Ю.П., 2018, ФТП, т.52, 8, страницы: 906-911.

МОЩНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ, ИЗЛУЧАЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ 650-1800 HM, И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Базовое подразделение – лаборатория Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей

Полупроводниковые лазеры лежат в основе электронно-информационной революции, произошедшей за последние 20 лет. Такие лазеры применяются в оптоволоконных системах, для передачи и хранения информации, в промышленном машиностроении, в датчиках телеметрии, оптических дальномерах, прицелах, в системах зажигания и системах ПВО, в охранных системах, в видеопроекторах, лазерных принтерах, лазерных указателях, сканерах, проигрывателях компакт-дисков, в хирургии, стоматологии, косметологии, терапии.

В основе полупроводниковых лазеров лежат гетероструктуры различных полупроводниковых материалов. Идея создания лазеров на гетероструктурах была высказана в ФТИ Ж.И. Алферовым и Р.Ф. Казариновым в 1963 году (Авторское свидетельство № 181737, 1963). Через 7 лет эта идея была полностью реализована сотрудниками сектора Ж.И. Алферова. В 1970 г. ими была впервые в мире получена непрерывная лазерная генерация инжекционных полупроводниковых лазеров при комнатной температуре. Лазеры излучали на длине волны 0.88 мкм и были выполнены на основе гетероструктуры GaAs-AlGaAs, полученной методом жидкостной эпитаксии. За эти работы Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, В.И. Корольков и Д.Н. Третьяков в 1972 г. были удостоены Ленинской премии, а Ж.И. Алферов в 2000 г. - Нобелевской премии.

Работы по созданию и исследованию полупроводниковых лазеров в широком диапазоне длин волн продолжаются в лаборатории «Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей» (далее – Лаборатория). Основным направлением работ является разработка, исследование и изготовление мощных одиночных полупроводниковых лазеров, линеек и решеток, излучающих в диапазоне длин волн 650 - 1800 нм, а также приборов на их основе. Для выполнения разработок создан полный комплекс технологического (МОС-гидридная эпитаксия), постростового (фотолитография, металлические и диэлектрические пленки) и измерительного оборудования для изготовления полупроводниковых наноструктур и лазерных диодов на их основе, исследования их электрооптических характеристик в широких интервалах непрерывных и импульсных токов накачки, температуры, частоты и длительности импульсов. Научные результаты коллектива в области физики и технологии полупроводниковых лазеров соответствуют лучшему мировому уровню.

В гетероструктурах на основе тройных твердых растворов Al_xGa_{1-x}As и Ga_xIn_{1-x}P, полученных в области составов x~0.50 методом МОС-гидридной эпитаксии, исследовано образование сверхструктурных фаз упорядочения со стехиометрией A_{1-x}B_{1+x}C2 (Puc.1).

Показано, что возникновение упорядоченного расположения атомов в твердом растворе, обусловленного понижением симметрии сфалеритной структуры соединений A_3B_5 , приводит к модификации фундаментальных свойств полупроводниковых систем, следствием чего является изменение ширины запрещенной зоны, переход от непрямозонного к прямозонному полупроводнику, инверсному порядку следования зон, усложнению оптических спектров сверхструктурных фаз в результате снятия вырождения с состояний, соответствующих потолку валентной зоны и дну зоны проводимости. Впервые экспериментально



подтверждены теоретические представления об уникальных топологических свойствах упорядоченных трехмерных конфигураций – возможности подстроиться под любую (в частности, «идеальную») длину связи и угол связи [1].

Была разработана и реализована концепция мощных полупроводниковых лазеров в системе твердых растворов In-Ga-AI-As-P, изопериодических







Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов при вводе зондирующего излучения в работающий лазер



Рисунок 4 – Типичные зависимости внутренних оптических потерь мощного лазера от тока накачки и температуры



Рисунок 5 – Мощный полупроводниковый лазер на теплоотводе и в корпусе

с подложками InP и GaAs. Основой этой концепции является создание лазерных гетероструктур с малыми внутренними оптическими потерями. Снижение внутренних оптических потерь (любыми доступными способами) позволяет сохранить дифференциальную квантовую эффективность при увеличении длины резонатора [2]. Увеличение длины резонатора обеспечивает максимальные рабочие токи и как следствие высокую выходную мощность излучения.

Разработана уникальная методика исследования внутренних оптических потерь лазера при произвольном токе накачки и температуре образца [3]. Суть метода заключается в том, что в волновод исследуемого образца вводится зондирующее излучение с энергией кванта меньше энергии всех запрещённых зон в образце (см. рис. 2).

На выходе из кристалла зондирующее излучение собирается, селектируется от собственного лазерного излучения и регистрируется. При протекании тока накачки через образец этот ток вызывает увеличение поглощения на свободных носителях и таким образом модулирует зондирующее излучение (рис. 3).

По величине модуляции и известной длине резонатора нетрудно рассчитать величину изменения потерь, которую в силу логарифмического характера зависимости мы вычисляем с точностью до постоянного слагаемого, которое в реальных лазерах не превышает 0.2-0.5 см⁻¹. В результате мы получили возможность определять внутренние оптические потери в различных гетероструктурах, сравнивать их эффективность и, что наиболее важно, разделять вклады различных физических процессов при высоких токах накачки, когда за насыщение мощности отвечают сразу несколько механизмов (например, рис. 4).

В результате применения разработанной концепции в полупроводниковых лазерах (рис.5) с шириной излучающей области 100 мкм достигнуты рекордные значения КПД ≈ 74 % и выходной оптической мощности 16 Вт в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре (рис.6). Лазерные диоды изготовлены на основе разработанной конструкции асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения AlGaAs/GaAs/InGaAs (λ=1060 нм) со сверхтолстым волноводом (1.7 мкм), выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии, имеющей минимальную величину внутренних оптических потерь 0.34 см⁻¹.



Рисунок 6 – Ватт-амперная характеристика и КПД мощного полупроводникового лазера с длиной волны излучения 1060 нм





В лазерных диодах условно безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) достигнуты рекордные значения КПД ≈ 40 % и выходных оптических мощностей 4 Вт и 18 Вт в непрерывном и импульсном (100 нс/1 кГц) режиме генерации, соответственно (Т = 25° C) [4]. Работы выполнялись совместно с индустриальным партнером - АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва. Результаты не имеют аналогов в России и находятся на уровне мировых достижений. Разработка широко востребована в первую очередь в приборах специального назначения и медицине.

С целью увеличения импульсной оптической мощности с одиночного кристалла полупроводникового лазера была разработана новая технология полупроводниковых эпитаксиально - интегрированных наноструктур. (рис. 7)

Вертикальная интеграция достигается применением нового конструктивного решения посредством последовательной туннельной связи полупроводниковых наноструктур, излучающих в ближнем ИК диапазоне (800-1100 нм). В рамках проведенных исследований разработаны методы создания резких p- и n- профилей легирования твердых растворов полупроводниковых соединений А³В⁵. Достигнута минимальная резкость профиля легирования 20 нм при применении прямого легирования и автолегирования углеродом. Получен максимальный уровень легирования ~ 10²⁰ см-3 при прямом легировании и автолегировании углеродом. Изготовленные лабораторные образцы туннельно-связанных эпитаксиально - интегрированных полупроводниковых наноструктур на основе Al-Ga-As твердых растворов имели максимальное значение пикового тока 30 мА при напряжении прямого смещения 100 мВ. Дифференциальное сопротивление на обратной ветке вольт-амперной характеристики при токах накачки более 10 А составляло не более 70 мОм. Разработанные мощные полупроводниковые импульсные лазеры на основе туннельно-связанной лазерной гетероструктуры имеют следующие выходные характеристики: выходная оптическая мощность в импульсе не менее 200 Вт; срок службы более 10⁹ штук импульсов; рабочая температура 25±1 °C; длительность импульса 100±30 нс; частота повторения импульса 1 – 3 кГц; апертура излучения 100±10 мкм; диапазон длин волн излучения 915-1060 нм.

Управление спектральными и пространственными свойствами полупроводниковых лазеров является ключевым элементом расширения их областей применения. Полупроводниковый лазер с распределенным брэгговским зеркалом (РБЗ, рис. 8) или распределенной обратной связью (РОС) является базовым элементом интегральной оптоэлектроники.

Основой такого лазера служит распределенный диспергирующий элемент. Поверхностное интегрированное распределенное брэгговское зеркало (П-РБЗ)



Рисунок 8 – СЭМ-изображение РБЗ сбоку



Рисунок 9 – СЭМ-изображение П-РБЗ сверху

высокого порядка дифракции (рис. 9) позволяет кардинально уменьшить ширину спектра генерации полупроводникового лазера полосковой конструкции, сохранив относительно простую технологию его изготовления.

В Лаборатории была разработана и реализована конструкция одномодовых и мощных многомодовых П-РБЗ лазеров. Экспериментальные исследования характеристик данных лазеров продемонстрировали высокую спектральную стабильность излучения (δλ<3Å) при сохранении всех преимуществ диодных лазеров. Следует отметить, что применение длинных П-РБЗ (0.5–3.0 мм) с большим периодом (с порядком дифракции N>6) стало возможным благодаря разработанным в Лаборатории совершенным лазерным гетероструктурам с рекордно низкими внутренними оптическими потерями (менее 0.5 см⁻¹) [5].Впервые для управления сверхвысокими интенсивностями лазерного излучения и токами инжекции с наносекундной и субнаносекундной динамикой переходных процессов разработаны и исследованы подходы, основанные на использовании эффекта электрической бистабильности в многопереходных полупроводниковых гетероструктурах. Известно, что наиболее доступный способ генерации мощных лазерных импульсов в излучателях на основе полупроводниковых гетероструктур основан на использовании накачки импульсами тока [6]. Однако переход в наносекундный и субнаносекундный диапазон длительностей мощных оптических импульсов в рамках общепринятых подходов, основанных на использовании полупроводниковых лазеров как внешних дискретных элементов, требует использования нетривиальных внешних генераторов токовых импульсов (что связано с наличием паразитных индуктивных связей между элементами), основанных на высоковольтных ключах, что заметно снижает энергетическую эффективность системы. Использование многопереходных полупроводниковых гетероструктур с электрической бистабильностью позволило решить задачу монолитной интеграции быстродействующего ключа и генератора лазерного излучения, что обеспечило предельное быстродействие переходных процессов переключения и высокие оптические мощности [7, 8]. Эффект электрической бистабильности обеспечил выполнение принципов малосигнального управления, а интегрированная оптическая активация - однородность включения, что критически важно для реализации предельных скоростей переключения высоких уровней токов (сотни ампер) и оптической мощности (десятки ватт). В нашем случае формирование двух устойчивых состояний обеспечивается за счет электрической бистабильности, реализованной в интегральной оптопаре гетерофототранзистор (N-p-N)-лазерный диод (N-i-P). Существенными особенностями работы данной оптопары являются односторонняя инжекция носителей Лазерный диод с импульсным блоком накачки



Рисунок 10 – Импульсные лазерные источники на основе полупроводниковых лазеров и лазера-тиристора



Рисунок 11 – Форма лазерного импульса (а) и зависимость пиковой оптической мошности лазера-тиристора для различных блокирующих напряжений (б)



(6)



только одного типа из транзистора в лазерную часть и подавление управляющего тока инжекции из лазерной части в базу транзистора. В результате, управление гетеро-фототранзистором реализовано за счет оптической активации излучением, генерируемым активной областью лазерной части. Показано, что в динамике инжекционных токов накачки лазерной части существенную роль играет процесс модуляции избыточными носителями заряда слаболегированных областей базы и коллектора транзисторной части. В результате происходит формирование домена поля, обеспечивающего функцию виртуального эмиттера электронов и дырок за счет ударной ионизации. В разработанных низковольтных лазерах-тиристорах (рис. 10) была достигнута пиковая мощность лазерных импульсов 55 Вт для одиночного излучателя (рис. 11) и 100 Вт для микролинейки апертурой 1000 мкм.

Впервые в низковольтных многопереходных структурах был обнаружен эффект пространственной динамики тока. В результате Фабри-Перо резонатор может быть представлен как квазидвухсекционная конструкция, включающая секцию усиления (накачиваемая током) и секцию поглощения, что позволяет реализовать режим генерации субнаносекундных лазерных импульсов [8]. Была продемонстрирована возможность генерации лазером-тиристором управляемой последовательности лазерных импульсов с пиковой мощностью 3.5 Вт и длительностью 58пс, при этом частота следования определялась частотой импульсов тока управления и максимальное значение достигало 200кГц, при рабочих характеристиках лазера-тиристора: блокирующее напряжение 7 В, импульс тока управления 25 мА/20 нс (рис. 12).

Фундаментальные исследования и прикладные разработки Лаборатории успешно используются в промышленном производстве лазерной техники, а запатентованные технические решения и изобретения коммерциализуются малыми инновационными предприятиями (рис. 13, 14).



Рисунок 13 - Непрерывный лазерный диод в корпусе с волоконным выходом с оптической мощностью до 10 Вт

Литература

- Seredin, P. V., Goloshchapov, D. L., Khudyakov, Y. Y., Lenshin, A. S., Lukin, A. N., Arsentyev, I. N., Prutskij, T. Experimental investigations of atomic ordering effects in the epitaxial GaxIn1xP, coherently grown on GaAs (100) substrates. Physica B: Condensed Matter.Volume 509, 15 March 2017, Pages 1-9
- Пихтин Н.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Слипченко С.О., Соколова З. Н., Шамахов В.В., Шашкин И.С., Бондарев А.Д., Вавилова Л.С., Тарасов И.С.. К вопросу о температурной делокализации носителей заряда в квантово-размерных гетероструктурах GaAs/A. G. As/I. G. As. //ФТП. – 2014. – Т. 48. – №. 10. – С. 1377-1382.
- Д. А. Веселов, Н. А. Пихтин, А. В. Лютецкий, Д. Н. Николаев, С. О. Слипченко, З. Н. Соколова, В. В. Шамахов, И. С. Шашкин, Н. В. Воронкова, И. С. Тарасов, "Исследование коэффициента поглощения в слоях гетероструктуры полупроводникового лазера", Квантовая электроника, 45:7 (2015), 604–606 [Quantum Electron., 45:7 (2015), 604–606]
- А. А. Мармалюк, Ю. Л. Рябоштан, П. В. Горлачук, М. А. Ладугин, А. А. Падалица, С. О. Слипченко, А. В. Лютецкий, Д. А. Веселов, Н. А. Пихтин, "Полупроводниковые А. G. InAs / InP-лазеры



Рисунок 14 - Импульсный лазерный модуль на диапазон длин волн 800 – 1600 нм с оптической мощностью до 300 Вт

со сверхузкими волноводами", Квантовая электроника, 47:3 (2017), 272–274 [Quantum Electron., 47:3 (2017), 272–274]

- В. В. Золотарев, А. Ю. Лешко, Н. А. Пихтин, С. О. Слипченко, З. Н. Соколова, Я. В. Лубянский, Н. В. Воронкова, И. С. Тарасов, "Поверхностные интегрированные дифракционные решетки высших порядков для полупроводниковых лазеров", Квантовая электроника, 45:12 (2015), 1091–1097 [Quantum Electron., 45:12 (2015), 1091–1097]
- Соколова З. Н., Пихтин Н. А., Тарасов И. С., Асрян Л. В. Пороговые характеристики полупроводникового лазера на квантовых ямах: учёт глобальной электронейтральности структуры // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №. 9. – С. 777-781.
- S. O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov, "Effect of the spatial current dynamics on radiative characteristics of high-power lasers-thyristors based on A. G. As/GaAs heterostructures," 2017, J. Appl. Phys., vol.121, no.5, 054502; dx.doi.org/10.1063/1.4975411
- Slipchenko, Sergey O.; Podoskin, Aleksandr A.; Soboleva, Olga S., et.al.,: "Generation of nanosecond and subnanosecond laser pulses by A. G. As/ GaAs laser-thyristor with narrow mesa stripe contact," Opt. Express, vol. 24, no.15, pp. 16500-16511, JUL 25 2016. Impact Factor : 3.749

ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С НАНОРАЗМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Базовое подразделение – лаборатория Интегральной оптики на гетеростурктурах

В Институте разработаны физические и технологические принципы полупроводниковой интегральной оптики на гетероструктурах, созданы новые интегрально-оптические приборы, включая инжекционные лазеры с распределенной обратной связью и узконаправленным распределенным выводом излучения, сформулированы принципы терагерцовой полупроводниковой оптоэлектроники. Предложены и развиты методы создания сверхбыстрого насыщающегося поглотителя в полупроводниках путем глубокой имплантации тяжелых ионов. В полупроводниковых лазерах, монолитно интегрированных с таким поглотителем, в режиме синхронизации мод впервые в мире получены субпикосекундые оптические импульсы и субтерагерцовые частоты их повторения, а в режиме модуляции добротности получены пикосекундные импульсы субкиловаттной мошности.

Генерация пикосекундных импульсов в режиме синхронизации мод

Впервые была продемонстрирована генерация субпикосекундных оптических импульсов в InGaAsP/ InP лазерах с насыщающимся поглотителем в режиме синхронизации мод при постоянной накачке. Области насыщающегося поглотителя формировались глубокой имплантацией ионами кислорода на циклотроне ФТИ. Впервые в мире получены оптические импульсы длительностью 650 фс с частотой повторения 110 ГГц без применения источника переменного тока.

Экспериментально исследованы двухсекционные полупроводниковые лазеры с активной областью, состоящей из трех квантовых ям InGaAs/InGaAlAs толщиной 3.1 нм [1]. Реализован режим пассивной синхронизации мод с частотой следования импульсов 10 ГГц. Проведено сравнение различных подходов для



Рисунок 1 — Автокорреляционная функция InGaAsP/InP лазера с насыщающимся поглотителем в режиме синхронизации мод. Частота повторения импульсов составляет 110 ГГц, длительность импульсов в приближении sech² формы составляет 650 фс.

определения стабильности следования импульсов. Изучена стабильность частоты следования импульсов, излучаемых полупроводниковыми лазерами в режиме пассивной синхронизации мод. Экспериментально показано, что уменьшение интеграла перекрытия квантово-размерного активного слоя с волноводной модой и увеличение времени захвата носителей на излучающий уровень приводит к сужению ширины линии радиочастотного спектра [2].

Исследование задержки включения полупроводниковых лазеров с квантоворазмерной активной областью

Продемонстрировано, что задержки включения в лазерах на основе квантовых ям и квантовых точек имеет принципиально разных характер: в лазерах на основе квантовых точках существует неисчезающая компонента задержки включения, не зависящая от



Рисунок 2. Экспериментальная зависимость задержки включения от отношения тока накачки к пороговому току для лазера на основе КЯ (квадратики) и лазера на основе КТ (кружочки).

тока накачки, тогда как данный эффект не наблюдается в лазерах на основе квантовых ям.

Включение лазеров с активной областью на основе квантовых точек при одновременной генерации через основное и возбужденное состояние

Исследованы лазерные структуры на основе квантовых точек, выращенные на положках GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Активная область включала 5 слоев самоорганизованных КТ InAs, разделенных спейсером GaAs толщиной 5.3 нм, покрытых слоями In_{0.14}Ga_{0.86}As. Мезаструктуры имели полоски 4 мкм. Лазеры длинной от 1.5 до 2.5 мм с высоко- и антиотражающим покрытием на задней и передней гранях, соответственно, излучали или через основное состояние GS (около 1265 нм), или одновременно через основное GS и возбуждённое состояние ES (около 1190 нм) в полном диапазоне токов накачки.

Импульсы с передним фронтом 5нс были получены от мощного источника тока (величина амплитуды до 2A). Одновременно детектировалось полное выходное излучение и излучение только через ES с помощью узкополосного спектрального фильтра. Задержка между включениями GS и ES определялась как разница во времени между экспоненциальным увеличением выходной мощности GS и экспоненциальным увеличением выходной мощности ES, измеренными фотоприемником. При этом учитывалась разница длин распространения оптического и электрического сигналов. Показано, что при двухуровневой генерации при плавном включении тока накачки (при длительности переднего фронта импульса накачки порядка 5 нс), основное и возбужденное состояния в лазере на основе квантовых точек включаются не одновременно (рис. 3). Показано, что задержка включения как основного, так и возбужденного состояний в лазере на основе квантовых точек зависит от величины тока накачки. Задержка включения возбужденного состояния относительно



Рисунок 3. Полная (GS+ES) и после применения фильтра (ES) экспериментальные кривые включения при токе накачки 1 A и переднем фронте токового импульса 5 нс; (b) Численное моделирование. Δt обозначает разницу между временем включения GS и ES. Тонкая линия соответствует полному (ES + GS) выходному излучению лазера. Значения заданных параметров при моделировании: g = 2, Jp = 200, B^{gap} = 10, B^{gap} = 100, η = 0.01. Штриховая линия на рисунке (b) показывает ток накачки J(t).



Рисунок *4* – Результаты численного моделирования, *иллюстрирующ*ие эффект изменения α-фактора в профиле импульса: (a) J_o = 100 (b) J_o = 110 (c) J_o = 250. Синяя пунктирная линии на рисунке (a) соответствует токовому импульсу. Красная линия на рисунках (b) и (c) показывает изменение α-фактора во времени.



Рисунок 5. Зависимости максимума амплитуды и полуширины длительности выходных оптических импульсов одномодового лазера от величины амплитуды импульсов тока накачки длительностью менее 1 *ns*. основного может достигать нескольких наносекунд и уменьшается с ростом тока накачки [3].

Срыв генерации в лазерах с активной областью на основе квантовых точек

Показано, что при накачке короткими импульсами тока высокой амплитуды динамическое изменение альфа-фактора приводит к значительному изменению формы импульса лазера на КТ и может приводить к срыву генерации, как показано на рис.4 [4].

Получение ультракоротких мощных оптических импульсов от полупроводниковых лазеров при прямой токовой накачке

Для получения мощных оптических импульсов от полупроводниковых лазеров при прямой токовой накачке были исследованы многомодовые и одномодовые полупроводниковые лазеры [5]. Длина волны генерации многомодовых лазеров находилась в диапазоне 960 – 980 nm, мощность излучения в непрерывном режиме составляла 10 W при токе накачки 12 А. Длина волны генерации узкополосковых одномодовых лазеров находилась вблизи 1060 nm. Выходная мощность излучения составляла 170 mW при рабочем токе 300 mA.

Показано, что подбор параметров токовой накачки дает возможность получить существенное обострение выходного оптического импульса: менее 80 пс для одномодового лазера и 120 пс для широкополоскового многомодового лазера при длительности импульса накачки 1 нс и менее 40 пс для одномодового лазера при длительности импульса накачки 0.5 нс (рис. 5).

Литература:

- М.С.Буяло, И.М.Гаджиев, Н.Д.Ильинская, А.А.Усикова, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, Е.С.Колодезный, В.Е.Бугров, А.Ю.Егоров, Е.Л.Портной, «Синхронизация мод в лазерах спектрального диапазона 1.55 mum на основе "тонких" квантовых ям», Письма в журнал технической физики 2018, т.43(4) с. 95.
- 2 М.С.Буяло, И.М.Гаджиев, И.О.Бакшаев, Е.Л.Портной,

«Ширина линии радиочастотного спектра в лазерах на квантовой яме с пассивной синхронизацией мод», Письма в журнал технической физики 2013, т.38(3), с. 41.

- 3 E.A.Viktorov, T. Erneux, E. D. Kolykhalova, V. V. Dudelev, J. Danckaert, K. K. Soboleva, A. G. Deryagin, I.I.Novikov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov, G.S.Sokolovskii "Slow passage through thresholds in quantum dot lasers", Phys. Rev. E 2016, v.94(5), 052208.
- 4 G.S.Sokolovskii, E.A.Viktorov, M.Abusaa, J.Danckaert, V.V.Dudelev, E.D.Kolykhalova, K.K.Soboleva, A.G.Deryagin, I.I.Novikov, M.V.Maximov,

A.E.Zhukov, V.M.Ustinov, V.I.Kuchinskii, W.Sibbett, E.U.Rafailov, T.Erneux, "Dropout dynamics in pulsed quantum dot lasers due to mode jumping", Appl. Phys. Lett. 2015, v.106(26), 261103.

5 Е.Д.Колыхалова, В.В.Дюделев, С.В.Зазулин, С.Н.Лосев, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, М.В.Ефанов, Г.С.Соколовский «Получение ультракоротких мощных оптических импульсов от полупроводниковых лазеров за счет управления параметрами токовой накачки», Журнал технической физики 2017, т.87(12), с.1887-1891.

БЕССЕЛЕВЫ ПУЧКИ И «ОПТИЧЕСКИЕ ПИНЦЕТЫ»

Базовое подразделение – лаборатория Интегральной оптики на гетеростурктурах

В Институте была продемонстрирована возможность генерации мощных пространственно-инвариантных (Бесселевых) пучков при помощи полупроводниковых лазеров и светодиодов (упрощенная оптическая схема представлена на рис. 1). При помощи электрически накачиваемых вертикально-излучающих лазеров с внешним резонатором продемонстрирована генерация Бесселевых пучков с мощностью до нескольких ватт, диаметром центрального луча от 5 до 100 мкм и длиной распространения до десятков сантиметров (рис. 2). Из рис. 2 можно видеть, что пучки

Бесселя более высокого порядка с центральным диаметром световых отверстий приблизительно 5 мм и 2 мм могут генерироваться вертикально излучающими лазерами (VECSEL) с электрической накачкой, с аксиконами 160° и 140° [2]. Выходная мощность VECSEL для этих изображений составляла 200 мВт. Такая прямая аксиконная генерация этих высших пучков Бесселя при таких уровнях мощности с эффективностью преобразования почти 100%. (из-за отсутствия какого-либо дополнительного светоизлучающего светового элемента, такого как голограмма) стала возможна



Рисунок 1. Упрощенная оптическая схема EP-VECSEL для генерации пучка Бесселя [1]



Рисунок 2. Пучки Бесселя высокого порядка, генерируемые из EP-VECSEL на уровне мощности 200 мВт с аксиконами 160 ° (а) и 140 ° (б). Полная ширина изображений составляет 100 мкм [1].

благодаря работе VECSEL в режиме волны Гаусса-Лагерра более высокого порядка. Это может быть достигнуто путем выравнивания внешнего резонатора из-за присущего ему распределения по электрической накачке тороидальной формы, которое характерно для всех широкоапертурных VECSELs.

Этот результат является лучшим из продемонстрированных для полупроводниковых источников и находится на одном уровне с результатами, достигаемыми при использовании газовых и твердотельных лазеров. Разработанная методика использована для сверхфокусировки многомодового излучения, что позволило экспериментально продемонстрировать размеры фокусного пятна мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов, значительно меньшие предельно малого размера фокусного пятна, определяемого параметром распространения квазигауссового пучка M².

Также было показано [1], что параметры бесселевых пучков, получаемых от полупроводниковых лазеров, можно использовать для оптического захвата и манипулирования микроскопическими (в т. ч. биологическими) объектами в т.н. «оптических пинцетах» (рис. 3-4). Схематическое изображение экспериментальной установки показано на рисунке 3. Полупроводниковый лазер, используемый для генерации пучков Бесселя в экспериментах, связан с волокном (свыходной мощностью от волокна до 600 мВт и центрированием спектра излучения на длине волны 1065 нм). Выходной лазерный луч был коллимирован и перефокусирован. Пучок Бесселя был сформирован с помощью аксикона с углом 160°, что позволило определить поперечный размер 1/e² поперечного размера центрального дифракционного максимума 7 мкм. Размер элементов Бесселя был измерен с помощью сетки (шкала 10 мкм, 1 мм диапазона). Оптическая мощность в центральной доле пучка Бесселя с потерями в оптической схеме, принятой для учета, может быть изменена до 20 мВт. Требования к установке для контроля экспериментов по оптическому захвату были обеспечены высокоточными микропозиционерами, введенными в оптическую схему, и видеозаписывающим микроскопом



Рисунок 3. Схематичное представление экспериментальной установки для оптического захвата и манипуляции микроскопическими частицами с Бесселевыми пучками, генерируемыми из полупроводникового лазера.



Рисунок 4. Оптическое улавливание живого эритроцита в центральной части пучка Бесселя, генерируемого из полупроводникового лазера. В этом эксперименте образец перемещался относительно пучка Бесселя с объектом, захваченным его центральным дифракционным максимумом. Стрелки указывают на движение нелокализованного объекта, в то время как захваченный объект остается в центральной доле пучка Бесселя.

с ПЗС-камерой. Микрообъектами для исследования служили гранулы из полистирола (средний диаметр 10 мкм) в водном растворе (в качестве объектов с высоким показателем преломления) и пузырьков воды в масле (в виде частиц с низким показателем преломления). Раствор, содержащий микрообъекты, помещали на стеклянный предмет, покрытый покровным стеклом и контролируемый микропозиционирующим устройством.

Также было изучено оптическое улавливание живых эритроцитов в крови крыс. Кровь крысы растворяли в воде с добавлением гепарина с целью предотвращения свертывания. Средний размер клеток составлял приблизительно 5 мкм. На рисунке 4 показана серия экспериментальных изображений, демонстрирующих двумерное оптическое улавливание и манипулирование живым эритроцитом в центральной доле бесселевого пучка, генерируемого полупроводниковым лазером. В проведенном эксперименте образец перемещался относительно пучка Бесселя с объектом, захваченным его центральной долей.

Стрелками показано движение нелокализованного объекта, в то время как захваченный объект остается в центральной доле пучка Бесселя. В доступных оптических диапазонах мощности не было обнаружено повреждений живых клеток. Выполненные оценки продемонстрировали очень хороший потенциал применения пучков Бесселя, полученных из полупроводниковых лазеров, с вероятностью того, что они могут заменить другие типы лазеров для решения задач, связанных с оптическим захватом и манипулированием микрообъектами, включая живые клетки.

Литература:

- G.S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, S. N. Losev, K. K. Soboleva, A.G. Deryagin, K.A. Fedorova, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov "Bessel beams from semiconductor light sources" / Progress in Quantum Electronics 38 (2014) p. 157–188.
- G.S. Sokolovskii,M. Butkus,S.N. Losev,V. V. Dudelev,A. G. Deryagin,V. I. Kuchinskii,W. Sibbett,E. U. Rafailov,Proc. SPIE 8242(2012)82420T.
- G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, V.Melissinaki, S. N. Losev, K. K. Soboleva, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, M.Farsari, W.Sibbett, E. U. Rafailov, "Optical trapping with superfocused high-M2 laser diode beam", Proc. SPIE, v. 9343, 93430Q, doi:10.1117/12.2078957, 2015.
- G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, S. N. Losev, K. K. Soboleva, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, W.Sibbett, E. U. Rafailov, "Optical trapping with Bessel beams generated from semiconductor lasers", Journal of Physics: Conference Series, v. 572, 012039, DOI:10.1088/1742-6596/572/1/012039, 2014.
- Г. С. Соколовский, С. Н. Лосев, К. К. Соболева, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, В.Сиббет, В. И. Кучинский, Э. У. Рафаилов, "Манипулирование микрочастицами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров ", Письма в ЖТФ, 2014, т.40(11), с.53-59.

КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Базовое подразделение – лаборатория Интегральной оптики на гетеростурктурах

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) после публикации принципов их работы Р.А. Сурисом и Р.Ф. Казариновым [1] и их первой реализации группой Ф. Капассо привлекают все возрастающее внимание научного сообщества в связи с уникальными возможностями их использования в различных областях науки и техники (химическое зондирование, ультра-чувствительное обнаружение различных газов в атмосфере, спектроскопия, биомедицинские применения, космическая связь и др.). К настоящему времени ККЛ созданы и исследованы в широких спектральных диапазонах - среднем ИК (3-16 мкм) и в терагерцовом диапазоне.

Гетероструктуры ККЛ, использованные в исследованиях лаборатории Интегральной оптики на гетеростурктурах, были изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в ООО «Коннектор Оптикс» на установке Riber 49. Эпитаксиальный рост проводился на подложках InP:*n*⁺. Активная область состояла из 50 каскадов, состоящих из квантовых ям In_{0.53}Ga₀.₄₇As с барьерными слоями Al_{0.48}In_{0.52}As (подробное описание представлено в [2]). Постростовая обработка проводилась в лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей ФТИ.

Динамика включения ККЛ с длиной волны генерации ~8 мкм при комнатной температуре

Исследования характеристик ККЛ проводились при накачке импульсами тока с длительностью ~ 70 ns на половине от максимальной амплитуды, при T= 288К. Частота следования импульсов составляла 48 kHz, порог лазерной генерации ~6.4 A, что соответствует пороговой плотности тока 2.4 kA/см². Были проведены исследования зависимостей средней и пиковой мощности ККЛ от тока накачки.

Проведены исследования осциллограмм световых импульсов (рис. 1), что позволило определить токовую зависимость средней и пиковой интенсивностей излучения (рис. 2). Экспериментально оценена задержка включения квантово-каскадных лазеров при двукратном превышении порога лазерной генерации,



Рисунок 1. Осциллограммы импульсов света для значений тока I = 6.4 А, 7-13.5А с интервалом 0.5А. Наклонная стрелка, пересекающая осциллограммы, показывает увеличение тока накачки. Самая высокая осциллограмма соответствует импульсу тока накачки с амплитудой 13.5 А.





оказавшаяся на несколько порядков больше теоретических оценок.

Была продемонстрирована лазерная генерация квантово-каскадных лазеров на длине волны излучения вблизи 8100 nm при комнатной температуре [2].

Высокотемпературная лазерной генерации ККЛ в спектральной области 8 мкм

Для исследования температурных зависимостей характеристик ККЛ, экспериментальные образцы устанавливались на медный теплоотвод с системой термостабилизации на основе элемента Пельтье. Исследования характеристик ККЛ проводились в импульсном режиме с частотой следования импульсов 48 kHz. Длительность импульсов накачки на половине высоты составляла ~ 70 нс. Исследования температурных зависимостей характеристик ККЛ проводились в температурном диапазоне 288-338К.

Проведены исследования характеристик ККЛ с длиной волны генерации в области 8 мкм при высоких температурах, вплоть до +65°С [3]. Определены характеристические температуры температурных зависимостей величины порогового тока (рис. 3) и дифференциальной эффективности.

Спектральные исследования показали наличие двух линий генерации: коротковолновой ~ 7800 нм и длинноволновой~ 8100 нм (рис. 4).

Наблюдаемая конкуренция между коротковолновой и длинноволновой линиями генерации приводит к немонотонному характеру зависимости интенсивности излучения от тока накачки (рис. 5).

Двухчастотная генерация ККЛ спектрального диапазона 8 мкм

Проведены исследования квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона 8 мкм генерирующих двухчастотное излучение при комнатной температуре [4]. Исследования проводились при накачке образцов импульсами тока с частотой следования 48 kHz и



Рисунок 3. Зависимость величины порогового тока ККЛ от температуры.



Рисунок 4. Типичный спектр генерации ККЛ при различных температурах. Амплитуды токов накачки составляли: 10А для 288К. 12А для 303К и 13А для 318К и 338К.

длительностью на половине от максимальной амплитуды ~ 70 ns. Исследования проводились при стабилизации температуры образца на уровне 16°С. Максимальная амплитуда тока накачки составила 15 А. Пороговая плотность тока исследуемых образцов составила ~ 2.4 kA/cm², что соответствовало пороговым токам накачки ~ 6.5 А.

Проведённые исследования спектров генерации позволили изучить зависимости интенсивности излучения для двух спектральных линий генерации, которые показали наличие насыщения и затухания длинноволновой линии генерации и линейный рост



Рисунок 6. Зависимости интенсивности излучения ККЛ от тока накачки. Заполненные квадраты (правая вертикальная ось) – измеренная зависимость интенсивности излучения ККЛ от амплитуды тока накачки. Пустые треугольники и круги (левая вертикальная ось) – зависимости интенсивности излучения ККЛ от тока накачки на линиях генерации ~ 8100 и ~ 7800 *nm* соответственно.



Рисунок 7. Результаты расчёта зонной диаграммы и профилей квадратов модулей волновых функций в зоне проводимости квантового каскада при приложенном электрическом поле 55 *kV/cm. Синим* цветом выделена активная область квантового каскада. Энергетический зазор между уровнями, выделенными жирными черными линиями, составляет 4.8 meV, что хорошо согласуется с экспериментом.



Рисунок 5. Зависимости выходной пиковой интенсивности от амплитуды тока накачки для различных температур.

интенсивности коротковолновой линии генерации (рис. 6). На основе анализа полученных данных, предложен механизм двухчастотной генерации в исследуемых образцах ККЛ (рис. 7).

Литература:

- Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, «О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводнике со сверхрешеткой», Физика и техника полупроводников. 1971. Т.5. В.4. С. 707-709.
- В. В. Дюделев, С. Н. Лосев, В. Ю. Мыльников, А. В. Бабичев, Е. А. Когновицкая, С. О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.Ю. Егоров, В.И. Кучинский, Г.С. Соколовский «Динамика включения квантово-каскадных лазеров с длиной волны генерации 8100 nm при комнатной температуре», Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 11, стр. 1708-1710.
- В.В. Дюделев, С.Н. Лосев, В.Ю. Мыльников, А.В. Бабичев, Е.А. Когновицкая, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.Ю. Егоров, В.И. Кучинский, Г.С. Соколовский «Высокотемпературная лазерная генерация квантово-каскадных лазеров в спектральной области 8 мкм», Физика твердого тела, 2018, том 60, вып. 11, стр. 2251-2254.
- В.В. Дюделев, С.Н. Лосев, В.Ю. Мыльников, А.В. Бабичев, Е.А. Когновицкая, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.Ю. Егоров, В.И. Кучинский, Г.С. Соколовский «Двухчастотная генерация в квантово-каскадных лазерах спектрального диапазона 8 мкм», Оптика и спектроскопия, 2018, том 125, вып. 3, стр. 387-390.

МОЩНЫЕ МОНОЛИТНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СВЕТОДИОДЫ С ПОВЫШЕННЫМИ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВИДИМОГО И ИК-ДИАПАЗОНА

Базовое подразделение – лаборатория Интегральной оптики на гетеростурктурах

В настоящее время светодиодные источники света находят широкое применение в светотехнических изделиях различного практического назначения. Это связано с развитием технологий изготовления, которые обеспечивают получение высокоэффективных светодиодов с повышенными светотехническими характеристиками. Однако на конечные светотехнические характеристики светодиодных излучателей влияет не только высокая эффективность светодиода, но и полезное использование света, излучаемого светодиодом.

Разработка конструкции монолитно-интегрированного светодиода нового поколения, где для эффективного сбора и фокусировки света было использовано физическое явление полного внутреннего отражения света на границе прозрачный полимерный корпус / воздух, была выполнена в лаборатории Интегральной оптики на гетероструктурах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ещё в 1992 году (патент № 2055420, приоритет 03.06.1992 г.).

Новая конструкция позволила увеличить такую важнейшую характеристику как сила света светодиодного излучателя по сравнению с широко распространенными излучателями в корпусе T-13/4 более чем на порядок. Наиболее широкое применение разработка нашла с началом поступления в 2003 году в широкую продажу первых мощных белых светодиодов фирмы LumiLeds (США), которые уже могли быть реально использованы для замены традиционных ламп накаливания.

Оценив преимущества выполненной в Институте разработки западные производители стали использовать для сбора и фокусировки света приставную вторичную оптику где используется эффект полного внутреннего отражения света на границе полимерный корпус / воздух. В настоящее время подобные конструкции широко распространены мировыми производителями при изготовлении светотехнических изделий.

Таким образом, выполненная сотрудниками Института разработка ещё за 12 лет до начала её массового использования предопределила основные тенденции развития оптики светодиодов в первом десятилетии XXI века. Разработка конструкции светоизлучающего диода (СИД) была удостоена диплома первой степени на международном конкурсе идей «Передовые дисплейные технологии и методы обработки изображений», проводившимся Samsung Electronics Co., Ltd в России при поддержке Российского отделения международного общества информационных дисплеев (SID) и МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва, 14 сентября 2004 г.).



Рисунок 1. Пятна засветки монолитно-интегрированных излучателей с симметричными и асимметричными кривыми силы света



Рисунок 2. Фара головного шахтерского осветителя

Необходимо отметить, что приставная вторичная оптика не позволяет исключить потери света светодиода при вводе его в прозрачный полимерный корпус и, в силу этого, светотехнические характеристики светодиодных излучателей западных производителей на достигают значений светотехнических параметров монолитно-интегрированных излучателей.

Преимущества новой конструкции излучателей, где мощный светодиод монолитно-интегрирован с оптической системой, заключаются не только в исключении обязательных потерь света, присущих вторичной оптике, но и в расширении возможности фокусировки света. Дополнительное создание макро- или микрорельефа на световыводящей поверхности позволяет получать излучатели с заданными симметричными или асимметричными кривыми распределения силы света и изготовить конечные светотехнические изделия с качественно новыми свойствами (рис. 1).

Для промышленного в Институте была разработана технология мелко-серийного производства монолитно-интегрированных светодиодных излучателей. В её основу было положено использование новых полимерных материалов холодной полимеризации, по

Рисунок 3. Лобовой локомотивный прожектор

своим эксплуатационным и оптическим параметрам превосходящих любые известные мировые аналоги. Разработки Института были внедрены в мелкосерийное производство монолитно-интегрированных светодиодных излучателей в отечественных инновационных компаниях.

Примеры использования разработки в промышленных изделиях представлены на рисунках 2 и 3.

Созданная интеллектуальная собственность Института в области монолитно-интегрированных светодиодов защищена 6-ю патентами.

- 1. Светоизлучающий диод, патент России №2055420, 03.06.1992
- Светоизлучающий диодный модуль, патент России №113073. 09.08.2011
- Светоизлучающий диодный модуль, патент России №120747, 19.01.2012
- Светоизлучающий диодный модуль, патент России №119167, 05.12.2011
- Светоизлучающий диодный модуль (варианты), патент России №115565, 23.12.2011
- Светоизлучающий диодный модуль, патент России №115963, 10.10.2011

ОДНОФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ В АТМОСФЕРНЫХ И Волоконных оптических линиях связи

Базовое подразделение – лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур.

Источники квантового света – одиночных фотонов и «запутанных» фотонных пар – являются обязательными элементами, входящими в состав систем квантовой криптографии, предназначенных для безопасной передачи информации как в атмосферных, так и в волоконных оптических линиях связи. Наиболее эффективные приборы такого типа. изготавливаемые на основе фотонных структур с эпитаксиальными полу12проводниковыми квантовыми точками InAs/GaAs, излучают в спектральном диапазоне 900-1000 нм, тогда как для работы атмосферных оптических систем связи требуются источники квантового света видимого спектрального диапазона, а волоконные оптические линии связи работают на телекоммуникационных длинах волн – 1.3 или 1.55 мкм. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработаны однофотонные источники света на основе эпитаксиальных квантовых точек InAs/(In,Al,Ga)As, CdTe/ZnTe и CdSe/ZnSe, излучающие в спектральных диапазонах, требуемых для функционирования систем квантовой криптографии, и ведутся исследовательские работы



Рисунок 1 – а) Микроскопическое оптическое изображение фотонной структуры с одиночной KT CdSe/ZnSe, излучающей в желто-зеленой области спектра. б) Электронно-микроскопическое изображение «оптических наноантенн» - усеченных конусов из полупроводникового соединения AlGaAs, полученных методом ионного травления. В нижней части конусов расположена активная область с одиночной KT.

с целью оптимизации параметров приборных структур.

Исследования, направленные на разработку конструкции и технологии изготовления источников одиночных фотонов видимого и телекоммуникационого спектральных диапазонов, проводились в лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур, начиная с 2014 г. В качестве базовой технологии изготовления фотонных структур с самоформирующимися квантовыми точками (KT) InAs/AlGaAs, InAs/InGaAs, CdTe/ZnTe и CdSe/ZnSe использовалась наиболее прецизионная методика молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Оптимизацией режимов МПЭ достигнуто формирование разреженных массивов КТ требуемого размера с поверхностной плотностью менее 10¹⁰ см⁻² для всех перечисленных систем полупроводниковых соединений, а использование методик фото- и электронной литографии, а также ионного травления привело



Рисунок 2 – а) Спектры излучения наноразмерных меза-структур различного диаметра с КТ CdTe/ZnTe. Для гетероструктур с разреженными массивами КТ уменьшение диаметра до нескольких сотен нанометров оказывается достаточным для выделения излучения одиночных КТ. б) – Автокорреляционная функция второго порядка, измеренная для линии излучения одиночного заряженного экситона (триона) в одиночной КТ CdTe/ZnTe.



Рисунок 3 – а) Типичный спектр микро-фотолюминесценции и автокорреляционная функция второго порядка для однофотонного излучения KT InAs/AlGaAs, измеренные при 8 К. б) Кросс-корреляционная функция совпадений для излучения экситона (X) и биэкситона (XX).

к формированию микрорезонаторных наноструктур [1] и структур с «оптическими наноантеннами» из диэлектрического или полупроводникового материала (см. рисунки 1, 2), позволивших пространственно выделить излучение одиночных КТ и увеличить эффективность сбора одиночных фотонов в 10 – 100 раз по сравнению с исходной планарной гетероструктурой.

Изготовленные источники квантового света на основе KT CdTe/ZnTe и CdSe/ZnSe, излучающие в области 480-600 нм, характеризуются неклассической однофотонной статистикой с достаточно малым значением автокорреляционной функции второго порядка g²(0): 0.03 – 0.2 в области температур 5–80 К [2-4] и высокой интенсивностью однофотонного излучения – более 10⁶ фотонов в секунду.







Рисунок 4. Идентификация спектральных линий КТ InAs/AIGaAs. На вставках: зависимость интенсивностей экситонной и биэкситонной линий излучения от плотности мощности возбуждения, а также поляризационные характеристики микро-фотолюминесценции.

С использованием системы материалов InAs/ AlGaAs, в результате оптимизации дизайна и параметров МПЭ роста гетероструктуры было получено интенсивное однофотонное излучение из одиночных КТ в широчайшем спектральном диапазоне – от видимого красного до ближнего инфракрасного света (640-1000 нм) [5]. Методами микро-фотолюминесцентной микроскопии и измерения кросс-корреляционных характеристик различных спектральных линий проведена идентификация природы данных линий и исследованы характерные особенности спектра индивидуальных КТ (рисунки 3, 4).

С использованием системы InAs/InGaAs были получены однофотонные источники для волоконно-оптических линий связи с длиной волны вблизи 1.3 мкм (рисунок 5); реализовано пространственное и спектральное выделение линий излучения биэкситонного каскада отдельных КТ с интенсивностью в несколько МГц и значением g²(0) менее 0.2.

В настоящее время исследования по данному направлению продолжаются с целью создания источников фотонов с высокой степенью неразличимости и исследуются вопросы оптимизации свойств КТ для эффективной генерации пар запутанных фотонов. Проводится оптимизация режимов МПЭ роста гетероструктур с КТ, предназначенных для достижения рабочих температур однофотонной генерации близких к комнатным условиям и прорабатывается возможность электрической накачки микрорезонаторных диодных наноструктур в системе InAs/AlGaAs.

Литература:

- K. G. Belyaev, M. V. Rakhlin, G. V. Klimko, U. M. Zadiranov, M. M. Kulagina, I. V. Sedova, S. V. Ivanov, and A. A. Toropov, Single photon emitters based on hybrid microcavities with InAs/AlxGa1xAs quantum dots, J. Phys.: Conf. Ser. 1038, 012120 (2018).
- S. V. Sorokin, I. V. Sedova, S. V. Gronin, G. V. Klimko, K. G. Belyaev, M. V. Rakhlin, I. S. Mukhin, A. A. Toropov, S. V. Ivanov, CdTe/ Zn(Mg)(Se)Te quantum dots for single photon emitters grown by M. E. J. Cryst. Growth 477, 127 (2017).

- M. V. Rakhlin, K. G. Belyaev, S. V. Sorokin, I. S. Mukhin, S. V. Ivanov, A. A. Toropov. Optical properties of blue-green single-photon sources based on self-assembled CdSe quantum dots, J. Phys.: Conf. Ser. 993, 012023 (2018).
- М. В. Рахлин, К. Г. Беляев, С. В. Сорокин, И. В. Седова, Д. А. Кириленко, А. М. Можаров, И. С. Мухин, М. М. Кулагина, Ю. М. Задиранов, С. В. Иванов, А. А. Торопов, Однофотонный источник при 80 К на основе диэлектрической наноантенны с CdSe/ ZnSe квантовой точкой, Письма в ЖЭТФ, 108(3), 201 (2018).
- M. V. Rakhlin , K. G. Belyaev, G. V. Klimko, I. S. Mukhin, D. A. Kirilenko, T. V. Shubina, S. V. Ivanov, and A. A. Toropov, InAs/A. G. As quantum dots for single-photon emission in a red spectral range, Sci. Rep. 8, 5299 (2018).

ЦЕЗИЕВЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РАЗРЯД (ИПР) В БЕЗРТУТНЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ЛАМПАХ

Базовое подразделение – лаборатория Физики низкотемпературной плазмы.

Разработка новых энергоэффективных источников света остаётся актуальной, несмотря на большие достижения за последние годы в светодиодном освещении. Предложенные и исследуемые в ФТИ им. А. Ф. Иоффе цезиевые лампы с сильноточным импульсно-периодическим разрядом (ИПР) высокого давления экологически безопасны, имеют исключительно высокое, «солнечное» качество света (индекс цветопередачи R_a до 98 при цветовой температуре Tc ≈ 4500 K), недороги (до 3-5 коп/люмен), и достаточно энергоэффективны (до 60-70 лм/Вт). Удачное сочетание характеристик позволит им успешно конкурировать и с газоразрядными лампами, и со светодиодами — в области высококачественного освещения и при генерации больших световых потоков, где у последних определенные трудности при компоновке и охлаждении кристаллов.

Изучение цезиевого ИПР было начато в лаборатории Физики низкотемпературной плазмы в конце 90-х годов на базе выполненных в 60-80 гг. фундаментальных исследований цезиевой плазмы низковольтных дуг (плотной и кнудсеновской) в термоэмиссионных преобразователях. В процессе исследований были разработаны уникальные зондовая и спектроскопическая диагностика плазмы в крайне сложных условиях разрядов с термоэмиссионным катодом, всесторонне исследованы необычные свойства этих разрядов, создана их самосогласованная теория, поэтому обращение к цезиевому ИПР как источнику видимого света было естественным продолжением изучения и практического использования различных форм цезиевого разряда.

Особенность цезиевой плазмы, которая обратила на себя внимание еще при исследовании цезиевой низковольтной дуги - яркое белое свечение даже при плотностях тока порядка нескольких А/см² и сравнительно небольших концентрациях ne ~ 10¹⁴ см³. Оно обусловлено 6Р и 5D рекомбинационными континуумами атома Cs, с аномально большими сечениями рекомбинации, которые быстро, ~ n₂², растут с концентрацией, а также перекрывающим почти весь видимый диапазон спектром. Выяснилось. что цезий обладает и рядом других свойств, чрезвычайно благоприятных для создания осветительных ламп. Атом Cs обладает большими сечениями рассеяния для электронов, ионов и атомов, что обеспечивает низкую теплопроводность между осью разряда и стенкой горелки и достаточно высокое падение напряжения на положительном столбе без использования буферного газа ртути. Цезий имеет высокую упругость пара, что обеспечивает высокие рабочие давления при допустимых для разрядной трубки (горелки) температурах ≤1500 К. Адсорбция атомов цезия на электродах снижает их работу выхода, обеспечивая токи в десятки и сотни ампер при невысоких (1000-1300 К) температурах электродов и без катодных пятен на них. Благодаря низкому потенциалу ионизации атома цезия (3,89 эВ) плотную плазму с высокой степенью ионизации и высокими концентрациями n ~1017-1018 см-3, при которых практически вся видимая световая энергия выносится в континуумах, можно получать с наименьшими затратами энергии.

Однако попытки (с начала 60-х годов) получить такие концентрации и создать эффективные цезиевые лампы на переменном токе с дросселем оказались неудачными – для этого требовалась мощность, при которой тепловая нагрузка на горелку намного превышает допустимую. Поэтому идея использовать ИПР для реализации высокой температуры и концентрации плазмы в импульсе при допустимой средней мощности для цезиевой лампы оказалась очень продуктивной.

Для расчета режимов разряда и его светотехнических характеристик была развита теория сильноточного ИПР высокого давления в парах цезия и построена его математическая модель как источника видимого света с рекомбинационным механизмом излучения, позволяющая по заданному импульсу тока рассчитать во времени параметры плазмы и разряда. Первоначально модель строилась в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), затем в двухтемпературном приближении, были рассмотрены и учтены процессы проскальзывания компонент плазмы друг относительно друга и нелокальный теплообмен излучением [1]. При описании оптических свойств плазмы использовалось 50 наиболее ярких линий цезия, 12 рекомбинационных континуумов и тормозное излучение. При определении полуширины всех линий учитывалось штарковское уширение электронами, а для резонансной линии, кроме того, уширение атомами при резонансной передаче возбуждения. Такая подробная модель обеспечила хорошее согласие расчетных и экспериментальных спектров (рис.1.).



Рисунок 1. Спектральная интенсивность излучения I, в момент окончания импульса тока, красная линия – эксперимент, синяя – расчет. Параметры разряда: амплитуда импульса тока 80 А, длительность 45 мкс, частота 1300 Гц, дежурный ток в промежутке между импульсами 0,6 А. Параметры горелки (сапфировой разрядной трубки): межэлектродное расстояние L = 55 мм, внутренний диаметр 2r = 5 мм.

Важнейшим моментом при формировании спектра оказалось слияние в плотной плазме высших членов спектральных серий, сходящихся к порогу фотоионизации, вследствие их столкновительного уширения, и снижение потенциала ионизации атомов цезия, вызванное кулоновским взаимодействием частиц, что приводит к существенному, до 100 нм и более, сдвигу порогов 6Р и 5D континуумов в длинноволновую область (см. рис. 2). В результате континуумы образуют непрерывный спектр практически во всей видимой области, что и определяет высокое качество света ламп с цезиевым ИПР.



Рисунок 2. Спектр излучения ИПР в цезии вблизи порога 6Р континуума (порог для изолированного атома показан стрелкой): чёрная линия - эксперимент, красная - расчёт. Значения амплитуды импульса тока I_{max}, продолжительности импульса t_p и частоты следования импульсов v для трёх режимов горения разряда:

$I - I_{max} - II, 5 A, I - II MKC,$	v – 900 г ц
2 – І = 33 А, т = 30 мкс, v	= 900 Гц;
3 – I _{max} = 80 А, т = 45 мкс, v	= 900 Гц.

Рассмотрена эффективность спектрального источника излучения на основе плазменного столба ИПР [2, 3]. Показано, что при любой температуре плазмы на оси столба и любом радиальном профиле температуры плазмы максимальные потоки излучения достигаются в тех случаях, когда т_R(λ) ~ 1. В таких условиях реализуется и максимальная световая отдача столба дуги, которая по расчетам может составлять до 80 лм/



Рисунок 3. Зависимости от амплитубы тока Imax: W- средняя мощность разряда, п – светоавая отдача, R_n – интекс цветопередачи

Вт, что из-за отражения света на границах ее горелки и колбы соответствует светоотдаче лампы в ~65 лм/Вт. Это существенно больше, чем достигнутые в то время (за рубежом) светоотдачи цезиевых ламп ~ 45 лм/Вт), и этот результат стимулировал экспериментальные исследования в ФТИ.

Расчеты режимов ИПР с широкой вариацией «внешних» параметров показали, что зависимость светоотдачи от амплитуды импульса тока в широком диапазоне слабая (рис. 3), так же, как и от его длительности (в диапазоне т = 20-100 мкс) и формы. Это определило рациональный выбор источника импульсного питания ламп. Полученные расчетные результаты дали исходный материал и для определения вариантов конструкции и размеров серии экспериментальных



Рисунок 4. Экспериментальные горелки с цезиевым наполнением.



Рисунок 5. Цезиевые демонстрационные лампы: а – малой, b – средней мощности.

горелок и ламп (рис. 4 - 6). Они были изготовлены на предприятии ОАО НПО «Зенит», совместно с которым проводилась экспериментальная часть данной работы.

Расчеты определили и область перспективных режимов для их экспериментального исследования. Вначале главной задачей было сравнение расчёта и эксперимента и по «электрическим» параметрам импульса, и по спектроскопическим. В измерениях была использована методика стробируемого интегрирования, позволяющая снимать спектр и пространственное распределение светимости в любой момент импульса. Расчет обычно проводился конкретно для зарегистрированного на эксперименте линейно-нарастающего импульса тока и измеренного (по показаниям термопары) давления цезия. Во всех случаях и для импульса напряжения, и для спектров имело место хорошее количественное согласие, пример которого представляют рис.1 и 2. Полученные в этой части работы результаты подтвердили правильность основных положений теории ИПР и корректность модели.

На последующих этапах основное внимание было уделено исследованию и оптимизации светотехнических параметров ламп, прежде всего светоотдачи. С этой целью цезиевый ИПР был исследован в широкой области «внешних» параметров - амплитуда и длительность импульса тока, средняя мощность и мощность в импульсе, частота и скважность, давление паров цезия, межэлектродное расстояние и другие размерные факторы. Были установлены основные особенности и закономерности влияния этих факторов, т.е. по существу была выполнена предварительная оптимизация параметров лампы. В результате в наиболее благоприятных режимах была получена светоотдача до 60-65 лм/Вт, что очень хорошо совпадало с ее предельными значениями, полученными при расчетах.

Следует подчеркнуть, что относительно небольшая светоотдача цезиевых ламп - в сравнении с натриевыми лампами и светодиодами (для них получены р до 150 лм/Вт),- обусловлена не малой эффективностью генерации излучения цезиевым ИПР, а планковским характером его спектра, который, собственно, и обуславливает высокие качество их света [4]. Без сплошного спектра во всей видимой области невозможно получить правильную передачу цветов и значения Ra > 90, но при этом резкий спад чувствительности глаза от максимума (λ = 555 нм) к границам области существенно уменьшает вклад длиннонового и коротковолнового участков видимого спектра в воспринимаемый глазом световой поток. Для монохромных (узкополосных) источников, длина волны которых близка к максимуму чувствительности глаза, этот фактор отсутствует. Кроме того, для освещения теряется энергия ИК и УФ частей планковского спектра. Расчеты показали [3,4],



Рисунок 6. Цезиевый демонстрационный уличный светильник средней мощности.

что в эффективных режимах цезиевого ИПР до 95% вложенной в разряд электрической энергии превращается в излучение, но лишь немного более половины ее приходится на видимую область.

Уже достигнутый для цезиевых ламп уровень светоотдачи 60-65 лм/Вт делает возможным их широкое применение, особенно если учесть, что технология их массового производства практически та же, что и натриевых. Это те сектора освещения, где решающим фактором является его качество: освешение кино- и телестудий, спортивных сооружений с телетрансляцией, музеев и выставок, витрин, растениеводство, уличное освещение (рис.6), и т.д Сейчас для этого используются ксеноновые лампы (имеют вдвое меньшую светоотдачу), металлогалогенные лампы (МГЛ) (содержат ртуть), лампы накаливания (малый КПД). В 2020г. запрет наступает для ртутных люминесцентных ламп и дуговых ртутных ламп высокого давления (ДРЛ), их светоотдача 50-60 лм/Вт. Запрещаемые лампы можно заменить цезиевыми без увеличения расхода электроэнергии и с существенным улучшением качества света.

Оказалось однако, что светоотдача в 60-65 лм/Вт - не предел для цезиевых ламп. Последние эксперименты показали, что существуют условия, при которых имеет место значительный, до +~20 лм/Вт, рост световой отдачи при определенном изменении внешних параметров – несмотря на то, что по теории светоотдача здесь, наоборот, должна уменьшаться. Именно в таких «аномальных» режимах была получена максимально достигнутая светоотдача ~70 лм/Вт. Обнаруженный эффект радикально меняет направленность исследований цезиевыз ламп, возвращая их к изучению физических процессов и деталей в «аномальных» режимах ИПР. Необходимо выяснить причины перехода разряда в это состояние, факторы, определяющие столь значительный рост светоотдачи, установить механизм роста, границы существованиия и предельный уровень светоотдачи в таких режимах. Если в цезиевых лампах в «аномальных» режимах разряда удастся увеличить светоотдачу до 80-90 лм/Вт, они смогут успешно конкурировать со светодиодами во многих секторах освещения, дополняя их и составляя вместе сними основу экологически безопасного и энергоэффективного освещения XXI века.

Публикации

- Lapshin V.F. Radiative heat transfer in plasma of pulsed high pressure caesium discharge. // J. Phys.: Conf. Ser., 2016, V. 669, P. 012035.
- Бакшт Ф.Г., Лапшин В. Ф. Генерация видимого излучения с непрерывным спектром в условиях импульснопериодического разряда высокого давления в цезии. // Успехи прикладной физики, 2017, т. 5, № 6, с. 525-533.
- Бакшт Ф.Г., Лапшин В. Ф. Об эффективности излучения столба плазмы в условиях импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии. // Письма в ЖТФ, 2013, т.39, в.19, с. 9-18.
- Бакшт Ф.Г., Лапшин В. Ф. Планковский характер и температура излучения импульсно-периодического разряда в цезии в видимой части спектра. // Письма в ЖТФ, 2016, т.42, в. 4, с. 104-110

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК КАРБИДА КРЕМНИЯ

Базовое подразделение – лаборатория Электроники полупроводников с большой энергией связи; разработки ведутся также в лаборатории Фотоэлектрических преобразователей и в секторах Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках и Теоретических основ микроэлектроники.

Терагерцовая оптоэлектроника интенсивно развивается во многих мировых научных центрах в связи с появлением новых актуальных задач. В последние годы непрерывно возрастает интерес к электромагнитным волнам терагерцового (ТГц) диапазона частот (0.1-10 ТГц). Это обусловлено в первую очередь тем, что данный диапазон частот долгое время оставался трудно доступным и поэтому был мало изучен. В то же время существуют перспективы применения ТГц излучения для решения многочисленных диагностических задач в химии, биологии и медицине, перспективы применения ТГц излучения в технике дистанционного контроля, в системах безопасности и борьбы с терроризмом. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся работы по созданию и исследованию источников спонтанного и когерентного ТГц излучения, а также фотоприемники ТГц диапазона.

Основные направления отечественной полупроводниковой электроники и ТГц оптоэлектроники на основе политипов карбида кремния были заложены в Институте в 1968-1990 гг. В настоящее время эти работы продолжаются в лаборатории Электроники полупроводников с большой энергией связи.

Гексагональные политипы карбида кремния характеризуются большим размером элементарных ячеек. В ряду 4H-, 6H-, 8H-SiC эти размеры составляют 10, 15 и 20 ангстрем соответственно. Это явление называют сверхпериодом. В общем случае, наличию сверхпериода в прямом пространстве, соответствует кратное уменьшение размера зоны Бриллюэна (3Б) в обратном пространстве. При этом кривая, описывающая закон дисперсии электрона, складывается в несколько раз, относительно границ ЗБ. Это явление называется фолдингом и отражает тот факт, что большому числу атомов в элементарной ячейке соответствует набор состояний с различной энергией в 3Б. Картина фолдинга на рис. 1 дает качественное понимание возможности минизонного спектра [1], но количественная картина минизонных расщеплений была получена в модели сильной связи с привлечением дополнительно s-р взаимодействия помимо s-s взаимодействия. В результате впервые была получена количественная картина минизонных расщеплений в электронных спектрах естественных свехрешеток 4H-, 6H-, 8H-SiC. Это явилось теоретической основой экспериментальных езультатов терагерцовой электолюминесценции, показанных на рисунках 2-4 [2-5].







Рисунок 2. Спектры ТГц электролюминесценции n^{++} n^- - n^+ 6H - SiC ECP , T = 7 K.







Рисунок 3. ТГц электролюминесценция n**-n⁻ -n⁺ структуры 8Н - SiC ECP ,T = 7 К.

Публикации

- Terahertz luminescence and electrical characteristics of SiC structures with natural superlattice in strong electric fields V. I. Sankin, at all, Infrared. Millim. Terahertz Waves, v.38, 1530 (2017).
- Терагерцовое излучение, вызванное ванье-штарковской локализацией электронов в естественной сверхрешетке карбида кремния, V.I. Sankin, at all, J. T. Lett., v.94, 5 362 (2011)
- Terahertz electroluminescence from 6H. S. C structures with natural superlattice V. I. Sankin , at all, Appl. Phys. Lett., 100, 111109 (2012).
- Терагерцовая генерация, обусловленная новыми эффектами в естественной сверхрешетке 6H. S. C V. I. Sankin, at all, Semicond., 49, 242 (2015).
- Terahertz emission from SiC natural superlattices in strong electrical field, V. I. Sankin, at. all, Appl. Phys. Lett., 108, 211108 (2016).

фотовольтаика

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Базовое подразделение - лаборатория Фотоэлектрических преобразователей

Обеспечение электрического беспроводного питания различных приборов и устройств посредством мощного оптического излучения, передаваемого в среде кварцевого волокна, является актуальной задачей, имеющей множество практических приложений. Оптическая линия передачи гарантирует идеальную гальваническую развязку между источником энергии и потребителем. Также оптоволоконные линии невосприимчивы к электромагнитным помехам и сами не являются источником таких помех. По этим причинам оптические системы питания имеют неоспоримые достоинства в задачах, где предъявляются требования по обеспечению электромагнитной совместимости, а использование медных проводников между источником электрической энергии и потребителем невозможно или нежелательно.

Другой областью применения оптических систем питания является беспроводная передача энергии на значительные расстояния через открытое пространство (безвоздушное или атмосферу). В зависимости от свойств среды и характеристик расходимости источника излучения длина такой трассы может составлять от десятков метров до тысяч километров, что позволяет решить задачу энергообеспечения, например, автономных роботов или космических аппаратов.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе обладает значительным заделом в области теории, математического моделирования и технологии создания фотоэлектрических преобразователей (ФП) мощного лазерного излучения (ЛИ) на основе полупроводниковых А³В⁵соединений.

Достижение высоких значений КПД в преобразоавтелях ЛИ в значительной степени определяется выбором полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны, согласованной с длиной волны излучения (рис. 1). Так использование AlGaAs/GaAs гетероструктур с шириной запрещенной зоны 1,42 эВ (GaAs) для излучения с λ < 0,87 мкм и InGaAs, Al-GaAsSb/GaSb, InGaAsP/InP гетероструктуры с шириной запрещенной зоны 0,7...1,2 эВ для излучений с λ=0,9...1,6 мкм позволяет снизить общий уровень термализационных потерь энергии излучения.

Разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе фотопреобразователи на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур (рис. 2) (далее GaAs ФП) имеют следующие преимущества: малые значения темновых токов, вследствие



Рисунок 1 - Теоретические зависимости КПД ФП от длины волны ЛИ: значения КПД для величин фототока i_{ϕ} = 0.1, 1.0, 10 А \cdot см 2 (линии 1, 2, 3 соответственно) от «граничной» длины волны полупроводникового материала ФП; 4, 5, 6, 7, – КПД ФП на основе InGaP, GaAs, GaSb и Ge.





Рисунок 3. Фотоэлектрические характеристики ФП ЛИ (а), а также импульс фотоответа (мощность 9 Вт) при длительности менее 0,9 нс в GaAs ФП при облучении лазерными импульсами (б).

большей ширины запрещенной зоны в GaAs и, следовательно, меньшие шумы; высокие значения предельно достижимых КПД (теоретические значения КПД GaAs ФП превышают 75% для мощного 10²...10³ Вт/ см² ЛИ), (рис.1); лучшая температурная стабильность КПД (при плотности фототока 30 А/см² температурный коэффициент составляет n_т = - 1,4·10⁻³ град⁻¹, что практически в 2 раза меньше чем для кремниевых ФП и в 3 раза для InGaAs ФП). Для GaAs ФП получены рекордные значения КПД (более 60%) при преобразовании ЛИ в диапазоне длин волн 810-830 нм (рис.3а) [1,2].

В модифицированных p-i-n GaAs ФП достигнуто высокое быстродействие (рис.3 б), что является необходимым условием для функционирования таких преобразователей в информационно-энергетических радиофотонных системах с одновременной передачей



Рисунок 4 - Гетероструктура ФП ЛИ с активной областью In_xGa_{1,x}As (a); изменение внутреннего квантового выхода, показывающего изменение края поглощения активной области ФП при изменении концентрации индия «х» в In_xGa_{1,x}As (б); изображение просвечивающей электронной микроскопии сечения буферных слоев (MML-1, MML-2,...) (в).



Рисунок 5 - Зависимости фактора заполнения нагрузочной характеристики (FF), фототока (I_{sc}) и КПД (η) от мощности лазерного излучения ЛИ на основе In_sGa_{1,2}As метаморфной гетероструктуры.

по лазерному лучу энергии и информации в гигагерцовом диапазоне частот. Высокий КПД сочетается с надежной работой GaAs ФП при высокой плотности излучения (до 10³ Вт/см²) и при повышенных температурах. Практические потребности в преобразовании энергии ЛИ с длиной волны 1064 нм реализованы за счет разработки метаморфных InGaAs структур, формируемых на GaAs или Ge подложках, и структур на основе четверных растворов InGaAsP, согласованных по параметру решетки с InP подложкой.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработаны ФП ЛИ для λ = 1064 нм на основе метаморфных гетероструктур In Ga, As, создаваемых методом МОС-гидридной эпитаксии на GaAs подложках (рис.4 а). Разработанная технология роста метаморфных компенсирующих (буферных) слоев [3] позволяет также управлять краем поглощения для фотоактивной области In Ga, As (рис.4 б), меняя концентрацию «х» индия в твердом растворе и соответственно, количество буферных слоев, позволяющих перейти от GaAs подложки к In Ga, As с необходимой шириной запрещенной зоны. Метаморфный буфер представляет собой набор релаксированных слоёв переменного состава, на интерфейсах которого загибаются (аннигилируют с образованием краевой дислокации) пронизывающие дислокации (рис. 4 в).

Для преобразования ЛИ с λ =1064 нм оптимальными



Рисунок 6 - Четырехсекторный ФП в схеме «полупроводниковый лазер – многоэлементный фотопреобразователь» для открытого оптического канала (а); концентраторный фотоэлектрический модуль из 64-х AlGaAs/GaAs ФП мощного лазерного излучения, КПД модуля - 44.5% при мощности 3.5 Вт (б), многоэлементный модуль из малоразмерных ФП ЛИ для оптоволоконных линий передачи энергии и информации (в).

являются ФП с активной областью In_{0.24}Ga_{0.76}As [4]. Снижение омических потерь [5,6] позволило получить КПД прибора на уровне 47% при плотности оптической мощности 5 BT/см² с сохранением КПД выше 40% в диапазоне до 25 BT/см² (рис 5).

Разработанные ФП ЛИ нашли применение в многоэлементных системах преобразования лазерного излучения, подводимого через открытое пространство (рис.6 а, б) или по оптоволокну (рис.6 в).

Публикации

- Khvostikov,VP; Potapovich,NS; Kalyuzhnyy,NA; Sorokina,SV; Mintairov,SA; Khvostikova,OA; Timoshina,NKh; Usikova,AA; Malevskaya,AV; Davidyuk,NYu; Vlasov,AS; Andreev,VM, "GaAs photovoltaic converters and arrays for wireless power transmitting systems"// EU PVSEC (2014) pp: 80-83.
- V.P.Khvostikov, N.A.Kalyuzhnyy, S.A.Mintairov, N.S.Potapovich, M.Z.Shvarts, S.V.Sorokina, A.Luque, V.M.Andreev "AlGaAs/

GaAs photovoltaic converters for high power narrowband radiation", AIP Conf. Proceedings v. 1616, 2014, pp. 21-24

- Mintairov,SA; Emelyanov,VM; Rybalchenko,DV; Salii,RA; Timoshina,NK; Shvarts,MZ and Kalyuzhnyy,NA, "Heterostructures of metamorphic GalnAs photovoltaic converters fabricated by MOCVD on GaAs substrates" // 2016, Semiconductors, v.50, 4 pp. 517-522
- Kalyuzhnyy,NA; Mintairov,SA; Nadtochiy,AM; Nevedomskiy,VN; Rybalchenko,DV; Shvarts,MZ, "InGaAs metamorphic laser (1064 nm) power converters with over 40% efficiency" // Electron. Lett., v.53, 3 (2017) pp. 173-175
- D.V. Rybalchenko, S.A. Mintairov, M.Z.Shvarts and N.A.Kalyuzhnyy, «Optimization of structural and growth parameters of metamorphic InGaAs/GaAs photoconverters grown by MOCVD» // Journal of Physics: Conference Series 741 (2016) ArtNo: #012086
- Rybalchenko,DV; Mintairov,SA; Salii,RA; Shvarts,MZ; Timoshina,NK and Kalyuzhnyy,NA, "Optimization of structural and growth parameters of metamorphic InGaAs photovoltaic converters grown by MOCVD" // Semiconductors, v.51, 1 (2017) pp.93-99

КАСКАДНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Базовое подразделение - лаборатория Фотоэлектрических преобразователей

Современные космические аппараты предъявляют повышенные требования к эффективности и радиационной стойкости бортовых солнечных батарей (СБ). Наиболее перспективным путем решения этих задач является разработка технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) из арсенида галлия и родственных ему соединений А³В⁵ на германиевых подложках.

Лаборатория фотоэлектрических преобразователей ФТИ (<u>http://pvlab.ioffe.ru</u>) имеет сорокалетний опыт разработок гетероструктурных ФЭП для космических и наземных солнечных батарей. В ФТИ была впервые в мире разработана технология гетероструктурных AlGaAs/GaAs ФЭП, с использованием которой в НПО «Квант» (г. Москва) было организовано крупномасштабное производство гетероструктурных солнечных батарей (рис. 1).

За последние десятилетия накоплен большой опыт эксплуатации космических солнечных батарей на основе AlGaAs/GaAs, AlGaInP/GaAs/Ge и других гетероструктур на основе соединений А³В⁵. Показано, что эти СБ обеспечивают увеличение КПД, удельного энергосъема и радиационной стойкости по сравнению с кремниевыми батареями. Это достигается за счет уменьшения толщины широкозонного «окна» до нескольких сот ангстрем, улучшения параметров материала активной области, создания тыльных потенциальных барьеров и встроенных полей, создания встроенного Брэгговского зеркала.



Рисунок 1 - Космическая станция «Мир» с гетероструктурной солнечной батареей, изготовленной в АО «НПП «Квант» по технологии ФТИ им. А. Ф.Иоффе.

В трехпереходных каскадных ФЭП, выполненных на основе трех последовательно соединенных p-n переходов в материалах в различной шириной запрещенной зоны, обеспечивается существенное увеличение КПД до значений более 30% в условиях околоземного космоса (воздушная масса AM0). За последние 10 лет в ФТИ накоплен значительный опыт по созданию 3-х переходных каскадных солнечных элементов методом МОС-гидридной эпитаксии. Дальнейшие перспективы увеличения КПД связываются с разработкой 4-х и 5-ти переходных каскадных ФЭП. Получение таких ФЭП возможно только с применением



Рисунок 2 - Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором, обеспечивающим отражение и эффективное поглощение «подзонных» фотонов

высокопроизводительных прецизионных технологических установок МОС-гидридной эпитаксии и современных постростовых (планарных) технологий.

Несмотря на большую стоимость каскадных космических батарей по сравнению с кремниевыми, использование каскадных ФЭП обеспечивает приблизительно 2-х кратное снижение суммарных затрат, благодаря увеличению удельного энергосъема, уменьшению размеров и веса СБ и увеличению ресурса работы СБ и снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту.

Методом МОС-гидридной эпитаксии в ФТИ созданы гетероструктурные ФЭП со встроенным Брэгговским зеркалом (рис. 2), состоящим из 20-30 слоев GaAs и AlAs толщиной 50-70 нм, в которых существенно улучшена стойкость к воздействию космической радиации, что обеспечивает увеличение срока службы солнечных батарей. Разработаны конструкции каскадных ФЭП с двухсекционным Брегговскими отражателями, характеризующимся более широким максимумом отражения, что позволило повысить их радиационную стойкость.

К 2006 году в ФТИ была разработана МОС-гидридная технология создания двухпереходных GalnP/GaAs гетероструктур и созданы первые в России каскадные солнечные элементы. Для создания каскадных гетероструктур в едином процессе был применен комплекс технологических разработок, включающий эпитаксиальный рост в системах полупроводников Al-Ga-As и Al-Ga-In-P, технологию создания туннельных p[±]-n⁺ переходов, методику согласования фотока в субэлементах каскадной структуры.

Успешное создание двухпереходного широкозонного GalnP/GaAs ФЭП, выращенного на подложке GaAs, позволило приступить к переносу разработанной структуры на подложку Ge с одновременным формированием в ней дополнительного третьего фотоактивного p-n перехода. Основными преимуществами замены GaAs-подложки на инородную являются: - снижение стоимости ФЭП за счет меньшей стоимости Ge при

GaAs- n ^{**}	Contact layer		CONTRACTOR OF THE OWNER OF	15050511505	
AllnP-n	Window		121000		
GaInP-n	Emitter		AL MARTINE		
GaInP-p	Base	/ [COLORADO -		
(Al)GaInP- p	BSF		A TRACE		
Tunnel Junction Tunnel Junction					
AlGaAs- n	Window				
GalnAs- n	Emitter				
GaInAs- p	Base				
(Al)GaInP- p*	BSF				
Tunnel Junction			arrived a start		
Tunnel Junction					A MAR
GaInAs- n	Buffer	1			KM
GaInP- n	Window		Contraction of the		2
n-Ge junction p-Ge – substrate					

Рисунок 3 - Гетероструктура каскадного солнечного элемента.

толщине слоев гетероструктуры порядка 7-10 мкм; улучшение механической прочности ФЭП и, как следствие этого, возможность уменьшения толщины ФЭП до 120-150 мкм и увеличения удельного (на единицу веса) энергосъема в солнечных батареях (менее 1 кг/м²).

Созданы каскадные солнечные элементы на основе гетероструктуры Ge/GaAs/GaInP (рис. 3), в которых достигнуты значения КПД, превышающие 30% [1] в условиях околоземного космоса (AM0), в том числе



Рисунок 4 - Фотоэлектрический модуль с оптической площадью 600 см² для космической солнечной батареи нового поколения с электрогенерирующими линейками каскадных солнечных элементов и линзовыми линейными концентраторами солнечного излучения типа линз Френеля, (несущая конструкция модуля разработки ИСС им. М.Ф. Решетнёва).

с концентраторами солнечного излучения. На основе разработанных каскадных ФЭП и линейных концентраторов (линз Френеля) с кратностью концентрации менее 10 солнц, разработаны и созданы космические концентраторные модули (рис. 4), обеспечивающие повышение удельного энергосъема до 400Вт/м², снижение стоимости солнечных батарей и улучшение радиационной стойкости с временем активного существования до 20 лет.

За последние годы в ФТИ им. А.Ф.Иоффе выполнено более десяти НИОКР по заказу предприятий Роскосмоса. Новизна и важность выполненных НИОКР состоит в разработке следующих новых подходов при создании космических солнечных элементов.

Выбор материалов для субэлементов каскадных ФЭП является наиболее критичным при разработке их структуры. С этой точки зрения в наиболее эффективной на данный момент структуре каскадных ФЭП на основе согласованных по параметру решетки материалов Ga_{0.52}In_{0.48}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge ограничены возможности увеличения КПД, вследствие не оптимальности ширины запрещенной зоны этих материалов. Это выражается в большем фототоке верхнего GalnP и нижнего Ge субэлементов по сравнению с фототоком среднего (GalnAs) субэлемента. Одним из реализованных путей повышения эффективности таких ФЭП явилось увеличение ширины запрещенной зоны материала верхнего субэлемента. Это позволило увеличить напряжение, генерируемое этим субэлементом, и рабочее напряжение всего ФЭП. Для твердых растворов GaInP существует возможность увеличения ширины запрещенной зоны при сохранении параметра решетки за счет снятия упорядочения этих твердых растворов. Исследования в этой области позволили разработать технологию, обеспечивающую снижение упорядочения в GalnP.

Создание структур с квантоворазмерными поглощающими средами (квантовыми точками и квантовыми ямами) позволило сдвинуть оптический край



Рисунок 5 - Зависимость КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях концентрирования «наземного» солнечного излучения

поглощения среднего субэлемента на основе GalnAs в длинноволновую область. Это обеспечило повышение тока, генерируемого этим субэлементом, и увеличение тока каскадного ФЭП на основе GalnP/GalnAs/Ge [2].

Разработанные структуры каскадных ФЭП включают:

 Квантово-размерные (20-30 нм) фронтальные широкозонные «окна» AlGaInP, обеспечивающее фоточувствительность до ультрафиолетовой области спектра.

 Квантово-размерные (10-50 нм) слои туннельных p+-n+ переходов, соединяющих фотоактивные области трех каскадов в гетероструктуре.

 Встроенные в гетероструктуру Брегговские отражатели (на основе периодических структур, образованных слоями с толщинами 50-70 нм), обеспечивающие отражение в фотоактивную область «подзонных» фотонов.

Короткопериодные сверхрешетки для создания



Рисунок 6 - Панель (общей площадью ~7 м²) для космической солнечной батареи с фотоактивной поверхностью 1 м², на основе каскадных ФЭП с линейными линзовыми концентраторами солнечного излучения, изготовленная в ФТИ им. А.Ф.Иоффе, (несущая конструкция панели СБ разработки ИСС им. М.Ф. Решетнёва). Структур с градиентом ширины запрещенной зоны и для получения новых материалов.

 Структуры с квантовыми точками в активных областях каскадных элементов.

Таким образом, для повышения КПД разработаны ФЭП нового поколения с использованием квантово-размерных слоев и новых материалов, как в активных областях, так и в коммутирующих их туннельных диодах.

На основе разработанных утонённых GaInP/GaInAs/ Ge многопереходных и монокристаллических кремниевых СЭ, интегрированных в кремниевое теплоотводящее основание, созданы гибридные ФЭП для космических солнечных батарей нового поколения с КПД более 33% при преобразовании космического солнечного излучения с кратностью концентрации менее 10 солнц, обеспечивающие снижение массогабаритных показателей фотогенерирующей части до 1,0 кг/м²;

На основе многопереходных СЭ, совместно с ИСС им. М.Ф. Решетнёва созданы концентраторный фотоэлектрический модуль (Рис.4) и панель космической СБ нового поколения (Рис.6) с удельной электрической мощностью до 400 Вт/м2 и увеличенным сроком эксплуатации до 20 лет на ГСО.


Рисунок 7 - Космическая солнечная батарея (~ 10 м²) на основе каскадных ФЭП, изготовленных на оборудовании ПАО «Сатурн» по ростовой технологии разработанной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Разработаны солнечные элементы, оптимизированные для работы на космических аппаратах, запускаемых в глубокий космос (в сторону от солнца), например, в условиях околомарсианских орбит и на Марсе, характеризующихся меньшей рабочей температурой солнечных батарей по сравнению с рабочей температурой «околоземных» космических батарей. КПД таких ФЭП достигает величины 46% при рабочей температуре минус 50°С [3] в условиях облучения концентрированным наземным солнечным излучением (рис. 6). В космических условиях КПД таких элементов составляет порядка 38% при температуре минус 50°С и кратности концентрирования 100-300 «солнц».

Достигнуто уменьшение примерно на порядок расхода полупроводниковых материалов в разработанных модулях с 10-кратным концентрированием солнечного излучения АМО (Рис. 4,6) и, как следствие этого, обеспечено снижение стоимости солнечных батарей. В концентраторных батареях достигнуто также улучшение радиационной стойкости за счет защиты фотопреобразователей концентратором и теплоотводящим основанием, а также за счет фотонного и инжекционного «отжига» концентраторных солнечных элементов, работающих при повышенных интенсивностях светового потока.

Разработанные технологии космических каскадных ФЭП внедрены в ПАО «Сатурн» (г. Краснодар) в серийном производстве космических батарей (рис. 8).

Разработкам каскадных ФЭП для космических батарей уделяется значительное внимание в мире [1-4]. Выполненные в ФТИ разработки каскадных ФЭП способствовали развитию отечественного производства энергоэффективных и радиационно-стойких космических батарей нового поколения, что является чрезвычайно важным для выполнения программ исследования космоса, космической связи и развития космических технологий.

Публикации

- Kalinovsky V. S., Grebenshchikova E. A., Dmitriev P. A., Il'inskaya N. D., Kontrosh E. V., Malevskaya A.V., Usikova A. A. and Andreev V. M. //Photoelectric characteristics of InGaP/Ga(In)As/ Ge solar cells fabricated with a singlestage wet chemical etching separation process// AIP Proceeding, 1616, 326 (2014).
- Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Salii R.A., Nadtochiy A.M., Payusov A.S., Brunkov P.N., Nevedomsky V.N., Shvarts M.Z., Martí A., Andreev V.M., Luque A. // Increasing the quantum efficiency of InAs/GaAs QD arrays for Solar Cells grown by MOVPE without using strain-balance technology // Progress in Photovoltaics (2016), v. 24, 9, p. 1261-1271.
- Andreev V.M., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Rumyantsev V.D., and Chekalin A.V. // On the main photoelectric characteristics of three-junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells in a broad temperature range (–197°C ≤ T ≤ +85°C) // Semiconductors (2016), v.50, 10, p.1356-1361.
- Pakhanov N.A., Andreev V.M., Shvarts M.Z., Pchelyakov O.P. // State-of-the-art architectures and technologies of highefficiency solar cells based on III–V heterostructures for space and terrestrial applications // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (2018) Vol. 54, No. 2, pp. 1–17

КОНЦЕНТРАТОРНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ФОТОЭНЕРГЕТИКА НА ОСНОВЕ КАСКАДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Базовое подразделение - лаборатория Фотоэлектрических преобразователей

Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии является наиболее перспективным направлением возобновляемой энергетики. Солнечные батареи обеспечивают энергопитанием космические аппараты и получают все большее применение на Земле. В 2017 г. в мире было установлено солнечных батарей мощностью более 100 ГВт при общей мировой мощности установленных к 2018 году батарей более 400 ГВт. Основным барьером в увеличении темпов развития солнечной фотоэнергетики является относительно высокая стоимость солнечной электроэнергии. Путями снижения стоимости являются: повышение КПД энергосистем и уменьшение расхода материалов для батарей.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе внес существенный вклад в создание высокоэффективных гетероструктурных солнечных элементов (СЭ) и концентраторных фотоэнергосистем на их основе [1-3]. Впервые в мире гетероструктурные AlGaAs/GaAs солнечные элементы были получены в 1969 году именно в ФТИ. С использованием результатов этих работ в НПО «Квант» было организовано промышленное производство нового поколения космических солнечных батарей, характеризующихся повышенной эффективностью и улучшенной радиационной стойкостью. Одна из таких батарей площадью 70 м² была установлена в 1986 году на базовом модуле Космической станции «Мир» и проработала на станции весь срок эксплуатации без заметного снижения мощности.

За последние 10 лет в ФТИ накоплен значительный опыт по созданию космических и наземных каскадных фотопреобразователей (рис. 1,2,3) и солнечных фотоэнергоустановок (рис. 4,5,6) на их основе с концентраторами солнечного излучения [1-3]. Сейчас КПД концентраторных каскадных GalnP/GaAs/Ge фотопреобразователей превышает 35% в космических



Рисунок 1. Структура каскадного солнечного элемента и пути увеличения его эффективности.



Рисунок 2. Спектр фотоответа трехпереходного солнечного элемента GalnP/GaAs/Ge, обеспечивающего КПД > 40% преобразования концентрированного солнечного излучения.

условиях и 40% в наземных условиях (рис. 3), что значительно выше, чем в существующих кремниевых и тонкопленочных солнечных батареях. Увеличение КПД каскадных фотопреобразователей достигнуто за счет «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определенной части полупроводниковой структуры (рис. 1, 2, 3).

В разработанных наземных концентраторных фотооэнергосистемах (рис. 4, 5) на основе гетероструктурных каскадных фотопреобразователей при 500-кратном концентрировании солнечного излучения обеспечивается существенное увеличение удельного (с единицы площади батарей) энергосъема за счет большего КПД и слежения за положением Солнца, а также снижение расхода солнечных элементов в 500 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения. Каскадные фотопреобразователи обеспечивают также значительное увеличение КПД и радиационной стойкости космических солнечных батарей - важнейшей составной части всех космических аппаратов. Применение концентраторов в космических батареях обеспечивает дополнительную защиту солнечных элементов от проникающей



Рисунок 3. Зависимости КПД каскадного InGaP/InGaAs/Ge CЭ от рабочей температуры при различных кратностях концентрирования излучения.

радиации и стимулирует в них фотонный и инжекционный отжиг радиационных дефектов при преобразовании концентрированного солнечного излучения, увеличивая ресурс работы батарей.

Преимуществом конструкции разработанных в ФТИ концентраторных солнечных модулей (рис. 4) являются малые линейные размеры концентраторов (менее 6 см) и фотопреобразователей при соотношении их площадей порядка 500. В этих модулях обеспечивается уменьшение их конструктивной толщины, снижение расхода основных материалов и простота отвода генерируемого тока и остаточного тепла от преобразователей. «Перегрев» фотопреобразователей относительно температуры окружающей среды составляет всего 30-35°С. Такой же перегрев имеет место и в кремниевых солнечных батареях без концентрации. Однако, концентраторные солнечные батареи обладают лучшей температурной стабильностью КПД (рис. 3). Так, при увеличении рабочей температуры на 35°С снижение мощности концентраторных батарей составляет всего 5%. Это преимущество разработанных концентраторных батарей увеличивается при их использовании в условиях с повышенной температурой окружающей среды.

Линзы Френеля в разработанных концентраторных модулях объединяются в панели и представляют собой



Рисунок 4. Наземная солнечная батарея на основе 576 каскадных солнечных элементов и концентраторов – линз Френеля.

композитную конструкцию с фронтальным элементом, выполненным из обычного силикатного стекла, и с тыльным Френелевским профилем, выполненным в тонком слое силикона. В этой конструкции фронтальная поверхность концентраторного модуля является плоской и стабильной к воздействию повреждающих факторов окружающей среды, включая воздействие абразивных частиц. В свою очередь, силикон является наиболее стойким прозрачным полимерным материалом по отношению к воздействию ультрафиолетового излучения и характеризуется высокой эластичностью. Френелевский профиль в силиконе получается путем полимеризации силикона на стекле при использовании промежуточного адгезивного слоя и матрицы с негативным Френелевским профилем.

Модули с концентраторами излучения должны быть все время точно ориентированы на Солнце. В разработанных в последнее время фотоэлектрических установках (рис. 5) модули расположены ступенчато на электронно-механической системе слежения, снабжённой датчиком положения Солнца. Такое конструктивное решение способствует снижению влияния ветровых нагрузок. Работая в полностью автоматическом режиме, установки расходуют на собственные нужды лишь около 0,1% от энергии, генерируемой размещенными на них модулями.

Разработанные солнечные батареи и энергоустановки нового поколения с концентраторами солнечного излучения открывают перспективы существенного снижения стоимости получаемой электроэнергии за счет снижения площади солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения и увеличения удельной (с единицы площади) мощности батарей. Прецизионное отслеживание положения Солнца и улучшенная температурная стабильность КПД приводит к дополнительному увеличению на 30-40% количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными фотоэнергоустановками по сравнению с традиционными батареями без систем слежения.

Концентраторной фотоэнергетике в мире уделяется значительное внимание [4]. Широкое использование таких установок в регионах Земли с высокой инсоляцией, в том числе на юге РФ, позволит уменьшить негативную нагрузку на окружающую среду, а также будет способствовать решению социальной проблемы обеспечения электроэнергией населения, не имеющего централизованного энергоснабжения.

Следующие факторы определяют необходимость ускоренного развития фотоэнергетики как наиболее перспективной ветви «зеленой» энергетики и основного метода энергообеспечения космических аппаратов:

 Развитие солнечной фотоэнергетики соответствует большинству высших приоритетов в утвержденной в 2009 году «Энергетической стратегии России до 2030 года» и утвержденным в 2012 году «Основам государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 года»:

- снижение вредного влияния ТЭК на окружающую среду;
- комплексное использование местных энергетических источников;
- увеличение роли возобновляемой энергетики;



Рисунок 5. Концентраторная солнечная установка на основе 2592 каскадных солнечных элементов и линз Френеля.

- снижение эмиссии вредных веществ в атмосферу.

• Повышение энергоэффективности и ресурса работы космических солнечных батарей нового поколения необходимо для выполнения программ космических исследований и развития космических технологий – одного из приоритетов технологического прорыва.

Публикации

- Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. I. I. V solar cells and concentrator arrays // High-Efficient Low-Cost Photovoltaics // Springer Series in Optical Sciences (2008), Vol. 140, p. 101-141.
- 2. Andreev V. M., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P. V., Rumyantsev V. D., and Chekalin A. V. // On the main photoelectric characteristics of three-junction

I. G. P/I. G. As/Ge solar cells in a broad temperature range (–197°C ≤ $T \le +85^{\circ}$ C) // Semiconductors (2016), vol.50, № 10, p.1356-1361.

- Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Salii R.A., Nadtochiy A. M., Payusov A. S., Brunkov P. N., Nevedomsky V. N., Shvarts M. Z., Martí A., Andreev V. M., Luque A. // Increasing the quantum efficiency of I.A./G.A. QD arrays for Solar Cells grown by M. V. E without using strain-balance technology // Progress in Photovoltaics (2016), v. 24, 9, p. 1261-1271.
- Pakhanov N.A., Andreev V.M., Shvarts M. Z., Pchelyakov O. P. // State-of-the-art architectures and technologies of highefficiency solar cells based on I. I. V heterostructures for space and terrestrial applications // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (2018) Vol. 54, No. 2, pp. 1–17.

КРЕМНИЕВАЯ ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ФОТОВОЛЬТАИКА В ФТИ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДО ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Базовое подразделение – лаборатория Физико-химических свойств полупроводников

Исследования тонких пленок на основе кремния в ФТИ им. А.Ф. Иоффе начались более 30-ти лет назад и существенно усилились в начале 80-х годов с появлением гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si). Как было показано в конце 70-х годов, осаждение этого материала со свойствами пригодными для применения в электронных приборах возможно при помощи разложения силана в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда, так называемым методом плазмохимического газофазного осаждения (ПХГФО). Этот метод позволяет осаждать тонкие пленки кремния на большие, до нескольких квадратных метров, площади с легированием в дырочный и электронный типы проводимости при добавлении в смесь газов, содержащих бор или фосфор. Более того, ПХГФО позволяет получать широкий класс материалов на основе a-Si со значительными вариациями ширины запрещенной зоны и структурой от полностью аморфной до сильно кристаллизованной при помощи изменения параметров процесса и состава газовой смеси. Это сделало a-Si перспективным материалом для применения в таких электронных приборах большой площади как фотоэлектические преобразователи (ФЭП), управляющие матрицы ЖК дисплеев, сенсоры и т.д. Несмотря на то, что в ФТИ ведутся работы по различным применениям a-Si, эта работа посвящена фотовольтаике, как примеру успешного применения результатов фундаментальных исследований для развития технологии поточного производства.

Исследования а-Si в ФТИ с самого начала носили как прикладной, так и фундаментальный характер. Работы 80-х и 90-х годов в основном были сосредоточены на исследовании процессов осаждения тонких пленок кремния и свойствах получаемых материалов. Особое внимание уделялось изучению емкостного разряда в смесях силана с водородом, ставшего основным методом осаждения a-Si в промышленных установках. Эти работы привели к развитию метода осаждения в тлеющей плазме с повышенной частотой (58 МГц) разряда, обеспечивающего повышенную скорость осаждения и улучшенные свойства пленок a-Si в сравнении с разрядом на стандартной (13,56 МГц) частоте. Были разработаны ФЭП на основе a-Si с переходом металл/ полупроводник и p-i-n типа. Вскоре стало понятно, что эффективность ФЭП на основе a-Si ограничена собиранием неосновных носителей заряда. т.е. дырок. Метод динамической интерференционной решетки, позволяющий измерять длины диффузии носителей заряда менее 50 нм, был предложен и систематически использован в ФТИ для исследования пленок a-Si. Эти работы имели существенную поддержку со стороны советской электронной промышленности в рамках различных проектов и привели к получению ФЭП с эффективностью около 5 %, что соответствовало мировому уровню развития тонкопленочной кремниевой фотовольтаики на тот момент.

Несмотря на то, что большинство прикладных программ по тонкопленочным кремниевым ФЭП были остановлены в связи с коллапсом российской электронной промышленности в 90-х годах, фундаментальные исследования были продолжены в ФТИ. Большое внимание уделялось изучению влияния ионной бомбардировки на свойства пленок а-Si. Были исследованы параметры распределения ионов в емкостном разряде различной частоты в атмосфере SiH₄/H₂ и их влияние на свойства пленок а-Si. Обнаружено, что умеренная ионная бомбардировка может улучшать свойства пленок в исходном состоянии, но практически не влияет на свойства в насыщенном состоянии, соответствующем длительной эксплуатации ФЭП в натурных условиях. Исследование фото- и термостимулированной метастабильности пленок a-Si показало, что изменения в распределении локализованных состояний при длительной эксплуатации ФЭП, приводят к уменьшению длины диффузии дырок до ~100 нм, что ограничивает эффективность ФЭП. Поэтому, дальнейшие исследования сместились в сторону наноструктурированных тонких пленок Si, демонстрирующих лучшие электронные свойства и повышенную стабильность по отношению к фотоиндуцированной деградации. Эти работы проводились в тесном сотрудничестве с европейскими исследовательскими центрами.

Наноструктурированные пленки кремния являются двухфазными материалами, содержащими аморфную и кристаллическую фазы. оптические и электронные свойства которых зависят от объемной доли и размеров кристаллитов. Показано, что осаждение этих материалов из смеси SiH₄/H₂ при повышенном давлении позволяет получить высококачественные материалы при скорости роста в разы выше, чем для обычного a-Si. Одним из таких материалов является полиморфный кремний (pm-Si), который получают в режиме близком к образованию пыли в плазме, когда небольшие частицы с максимальным размером несколько нм дают вклад в рост пленки. Такой материал содержит небольшую, в пределах нескольких процентов, объемную долю кристаллитов размером 2-4 нм. Материал имеет оптические свойства близкие к a-Si, меньшую плотность локализованных состояний, лучшие транспортные свойства и большую стабильность к фотоиндуцированной деградации. Обнаружено, что pm-Si может иметь диффузионную длину дырок до 300 нм в исходном и 200 нм в насыщенном состояниях [1], что примерно в 2 раза больше, чем обычно наблюдается для a-Si.

Микрокристаллический (или нанокристаллический) Si (µc-Si) это тонкопленочный материал со сравнительно высокой, обычно от 20 до 80 %, объемной долей кристаллитов. При этом материал с высокой долей кристаллитов демонстрирует оптические свойства близкие к с-Si и отсутствие фотоиндуцированной деградации, но его электронные свойства ограничены высокой концентрацией дефектов на гранях кристаллитов. Было проведено исследование особенностей осаждения и легирования такого материала с использованием различных газовых смесей. Показано, что использование SiF4 в качестве основного прекурсора или добавки к SiH4/H2 смеси [2] может улучшить структуру и электронные свойства микрокристаллического кремния.

Исследования ФТИ в области тонкопленочной кремниевой фотовольтаики усилились в 2010 году с созданием компании Хевел - совместного проекта ГК Ренова и Роснано. В рамках этого проекта при ФТИ был создан Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике (НТЦ ТПТ, далее - НТЦ) для технологической поддержки производственной линии Хевел. НТЦ ТПТ был оснащен опытной линией, позволяющей выполнять все технологические операции производства фотоэлектрических модулей как на промышленной линии, но с меньшей производительностью, и набором лабораторного оборудования для исследования материалов и ФЭП. Основной научный состав НТЦ был сформирован из действующих и бывших сотрудников ФТИ, длительное время работавших за границей.

Исходно, проект Хевел был основан на производстве фотоэлектрических модулей по микроморфной технологии. Эти модули в своей основе имеют двухкаскадные ФЭП из слоёв аморфного и микрокристаллического кремния (a-Si/µc-Si), монолитно соединенных между собой. Исследования ФТИ и НТЦ фокусировались на улучшении работы модулей. Оптимизация прозрачного проводящего оксида оптического окна, собственных слоев обоих каскадов и туннельного перехода между каскадами, одновременно играющего роль промежуточного отражателя, привели к увеличению аппертурной эффективности модулей до 11,7 %. Особое внимание уделялось увеличению стабильности характеристик модулей при эксплуатации.



Рисунок 1. Прогресс в эффективности Si-HJT ФЭП, совместно достигнутый ФТИ и НТЦ.

Для исследования фотоиндуцированной деградации модулей был использован как экспериментальный, так и теоретический подход [3]. Помимо лабораторных исследований, несколько стендов для натурных испытаний были установлены в регионах России с различным климатом для сбора информации о работе модулей в реальных условиях. Было обнаружено, что помимо эффекта Стеблера-Вронского, характеристики модулей снижаются из-за деградации характеристик микрокристаллического каскада вследствие образования кислород содержащих комплексов на границах зерен. Для уменьшения этого эффекта были разработаны модули с кристалличностью собственнного слоя второго каскада уменьшенной до 52-53%, что позволило сократить деградацию с 16 до 11 % без потерь в исходной эффективности.

Несмотря на прогресс в микроморфной технологии, падение цен на кремний, произошедшее вскоре после начала проекта Хевел, и постоянное развитие технологии традиционных с-Si модулей, сделало неконкурентоспособными модули с эффективностью ниже 15%, т.е. микроморфные в том числе. Это привело к запросу на существенное улучшение производственной технологии. В качестве ответа был предложен переход производственной линии на кремниевую гетероструктурную технологию (HJT), сочетающую использование пластин кристаллического кремния для поглощения света и применение тонких пленок a-Si для пассивации поверхности и формирования полупроводниковых переходов.

Старт работам по HJT технологии был дан в начале 2014 года. Наиболее сложной задачей была адаптация

производственных ПХГФО систем, разработанных для микроморфной технологии, под требования гетероструктурной технологии. Для этого были разработаны процессы осаждения пассивирующих и легированных слоев, обеспечивающих необходимые электронные свойства при толщине 8-20 нм и равномерность в пределах 15 %. Специальный буферный слой, предотвращающий влияние эпитаксии на свойства пассивирующего слоя, был разработан и введен в конструкцию гетероперехода. Для снижения оптических потерь за счет поглошения света в нефотоактивных слоях. в качестве лицевого легированного слоя был применен нанокристаллический слой n-типа толщиной менее 20 нм. Помимо адаптации ПХГФО систем, были разработаны остальные технологические шаги. необходимые для изготовления HJT ФЭП. В результате, за три года с начала проекта была достигнута эффективность HJT ФЭП свыше 22 % (см. Рис.1). Внедрение разработанной технологии в поточное производство позволило удвоить производственные мощности и обеспечило выпуск HJT ФЭП со средней эффективностью 21.5 % непосредственно после внедрения, с увеличением до 22 % в результате последовательного улучшения технологии в течение первого года производства, обеспеченного совместными усилиями ФТИ и НТЦ [4]. Переход на новую технологию позволил компании Хевел занять место среди мировых производителей модулей премиум класса.

Публикации

- Y.M.Soro, A.Abramov, M.E.Gueunier-Farret, E.V.Johnson, C.Longeaud, P.Roca i Cabarrocas, J.P.Kleider. Device grade hydrogenated polymorphous silicon deposited at high rates. J.Non-Cryst.Solids, 354, p.2092-2095 (2008);
- A.Abramov, P.Roca i Cabarrocas. Addition of SiF4 to standard SiH4+H2 plasma: an effective way to reduce oxygen contamination in μc-Si:H films. Physica Status Solidi (C), 7, 529-532, (2010);
- В.М.Емельянов, А.С.Абрамов, А.В.Бобыль, А.С.Гудовских, Д.Л.Орехов, Е.И.Теруков, Н.Х.Тимошина, О.И.Честа, М.З.Шварц. Исследование световой деграда-ции тандемных a-Si:H/uc-Si:H солнечных фотопреобразователей. ФТП, 47, с.667 (2013);
- D. Andronikov, A. Abramov, S. Abolmasov, K. Emtsev, G. Ivanov, A. Kukin, I. Nyapshaev, D. Orekhov, A. Semenov, G. Shelopin, E. Terukova, E. Terukov, N. Belkova, A. Dubrovskiy, P. Ishmuratov, A. Ivanov, D. Saykin, I. Shakhray, A. Smirnov, V. Tarasov, V. Timakov, A. Tomchinskiy, G. Kekelidze, A Successful Conversion of Silicon Thin-Film Solar Module Production to High Efficiency Heterojunction Technology, 34th EU PVSEC proceedings, pp. 732-735 (2017).

КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ СО СВЕРХШИРОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ДИАПАЗОНОМ ОТ 0.02-1100 HM

Базовое подразделение – лаборатория Квантоворазмерных гетероструктур

Кремниевые фотодетекторы являются одним из основных инструментов при регистрации излучения ближнего инфракрасного, видимого, ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов, а также при детектировании высокоэнергетичных электронов, протонов и ионов. Примерами сфер их применения являются метрология, фотометрия, спектрометрия, рентгенофлюорисцентный анализ, исследования в области физики высокотемпературной плазмы, регистрация синхротронного излучения, измерение скоростей потоков жидкостей и газов на основе доплеровского эффекта, измерение высоты облачности на аэродромах, а также другие задачи научного и прикладного характера. *Постоянно возрастающие требования к чувств*ительности и быстродействию систем регистрации требуют дальнейших исследований, направленных на улучшение, как отдельных параметров кремниевых детекторов, так и их совокупности.

Тематика разработки технологии и конструкции кремниевых фотодиодных детекторов имеет более чем 35 летнюю историю в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. За это время было выполнено значительное количество научных исследований и прикладных разработок в рамках оригинальной кремниевой СVD технологии.

В основе кремниевых фотодиодов (рис. 1) с рабочим спектральным диапазоном 0.02-1100 нм [1-4] лежит сверхрезкий p-n переход со сверхмалой глубиной залегания ~ 30 нм и пассивирующим покрытием из силицида бора толщиной ~ 10 нм (рис. 1b). Такая конфигурация фотодиода минимизирует потери регистрируемого излучения в "мертвом слое" активной области детектора и обеспечивает эффективную регистрацию электромагнитных квантов в диапазонах от ближнего ИК до жёсткого рентгена. Спектральные измерения разработанных детекторов (рис. 2a) проводились в Институте метрологии РТВ (Берлин, Германия) (рис. 2 b, c).

Важным направлением в современных разработках кремниевых детекторов является тематика лавинных фотодиодов (ЛФД, рис. 3) с пропорциональным умножением носителей заряда на основе эффекта ударной ионизации. Благодаря достижению коэффициентов внутреннего усиления ЛФД 100 и выше резко возрастает чувствительность систем на их основе.



Рисунок 1 – (a) Схематическая диаграмма структуры фотодетектора. (b) Изображение пленки Si-B между Si и Al, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.



Рисунок 2 - (а) Создаваемые Si-фотодетекторы. (b) Сертификаты тестирования РТВ. (c) Кривая фоточувствительности Si-фотодетекторов.



Рисунок 3 - (а) ЛФД в конфигурации регистрация спереди (front illuminated). (b) ЛФД в конфигурации регистрация сзади (back illuminated)







Рисунок 5 – Гибридная матрица Si-фотодетекторов формата 16х16 для визуализации плаз-мы.

На рис. 4 представлен результат сравнения чувствительности коммерчески доступного кремниевого ЛФД фирмы Hamamatsu (левая ось значений черного цвета) и кремниевого ЛФД разработанного в ФТИ им. А. Ф. Иоффе (правая ось значений красного цвета). Как вид-но из рисунка, чувствительность ЛФД, разра-ботанных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе более чем в 2 раза превышает аналогичный параметр обыч-ного кремниевого ЛФД.

Помимо дискретных кремниевых детекто-ров, проводятся разработки уникальных систем регистрации на их основе. Таким примером является система сверхбыстрой прямой визуа-лизации высокотемпературной плазмы в токамаке (рис. 5) [5, 6].

Не имеющая аналогов система на основе кремниевых детекторов сверхширокого спектрального диапазона позволяет непосредственно внутри вакуумной камеры токамака проводить непрерывную прямую регистрацию изображения высокотемпературной плазмы со скоростью до 1 млн. кадров в секунду. Такая скорость непрерывной фактически видеосъёмки плазмы обеспечивает возможность изучения процессов поведения примеси в скрейп-слое и динамики профиля радиационных потерь во время развития магнитогидродинамических неустойчивостей.

Математическая обработка данных, полученных с гибридной матрицы, позволяет реконструировать 2D изображение плазмы в формате 160х160 пикселов. Примеры изображений высокотемпературной плазмы из токамаков Т11М и Глобус-М приведены на рис. 6 и 7.



Рисунок 6 – Изображения динамики развития и срыва плазмы в токамаке T11M, полученные с помощью разработанной матрицы Si-фотодетекторов.



Рисунок 7 – Изображения динамики развития и срыва плазмы в токамаке Глобус-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), полученные с помощью разработанной матрицы Si-фотодетекторов.

Фотовольтаика

Публикации

- P. N. Aruev, Yu.M. Kolokolnikov, N. V. Kovalenko, A.A. Legkodymov, V. V. Lyakh, A. D. Nikolenko, V. F. Pindyurin, V. L. Sukhanov, V. V. Zabrodsky, Characterization of spatial homogeneity of sensitivity and radiation resistance of semiconductor detectors in the soft X-ray rangeNucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 603(1-2), 58 (2009).
- В.В. Забродский, В.П. Белик, П.Н. Аруев, Б.Я. Бер, С.В. Бобашев, М.В. Петренко, В.Л. Суханов, Исследование стабильности кремниевых фотодиодов в вакуумном ультрафиолете, Письма ЖТФ 38(17), 69 (2012).
- В. В. Забродский, П. Н. Аруев, В. П. Белик, Б. Я. Бер, Д. Ю. Казанцев, М. В. Дроздова, Н. В. Забродская, М. С. Лазеева, А. Д. Николенко, В. Л. Суханов, В. В. Филимонов, Е. В. Шерстнев,

Восстановление фотоответа кремниевых фотодиодов после облучения в вакуумном ультрафиолете, ФТП 47(2), 178 (2013).

- А. П. Артемов, Е. Х. Бакшт, В. Ф. Тарасенко, А. В. Федюнин, С. А. Чайковский, П. Н. Аруев, В. В. Забродский, М. В. Петренко, Н. А. Соболев, В. Л. Суханов, Временные характеристики кремниевых детекторов вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения, ПТЭ 1, 104 (2015).
- А. Г. Алексеев, А. М. Белов, В. В. Забродский, Гибридный матричный детектор формата 16х16 для визуализации XUV-излучения плазмы, ПТЭ 2, 58 (2010).
- Aleksevev, A. Belov, V. Lazarev, S. Mimov, A. Panov, V. Zabrodsky, Fast XUV plasma imaging: Matrix array detector with 1 Mfps frame rate, 38th E. S. Conf. on Plasma Physics, EPS 2011 - EuroPhysics Conference Abstr., pp. 301-304.

ВЫСОКОТОЧНЫЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК С ПОДВИЖНОЙ АПЕРТУРОЙ (МУЛЬТИСКАН)

Базовое подразделение – лаборатория Оптоэлектроники и голографии

В Институте разработан новый класс прецизионных позиционно-чувствительных датчиков (ПЧД) типа Мультискан, обеспечивающий рекордную в настоящее время разрешающую способность (до 2.5·10⁻⁶ от поля зрения), широкий динамический диапазон (до 10⁶) и устойчивость к внешним засветкам, превосходящим мощность полезного сигнала на 3 порядка.

Мультискан представляет собой позиционно-чувствительный датчик, сформированный в двух изолированных монокристаллических «карманах», созданных в структуре «кремний с диэлектрической изоляцией». Слой высококачественной двуокиси кремния обеспечивает сопротивление диэлектрической изоляции между монокристаллическими областями до 10¹² Ом. В двух протяженных карманах, длина которых определяет рабочую длину ПЧД, формируется линейная матрица встречно включенных диодов (D¹_i и D²_i). Диоды D¹, подсоединены к резистивной шине распределенного делителя напряжения (делительная шина) R, а диоды D², – к низкоомной сигнальной шине S (Рис. 1).

Принципиальное отличие позиционно-чувствительного датчика Мультискан от известных сенсоров



Рисунок 1. Устройство ПЧД Мультискан. (а) Разрез, (b) вид сверху



Рисунок 2. Блок схема формирования координатного отсчета в устройстве на основе ПЧД Мультискан при работе с модулированным светом.

латерального типа (например, фирмы Hamamatsu) и ПЗС линеек заключается в том, что прибор обладает подвижной вольтамперной характеристикой и работает в режиме адаптивного самосканирования. Интегрирование фототоков в приборе происходит не в смысле Коши-Римана, когда адресная система задает «где», а на выходе получается ответ «что», а в

Параметры позиционно-чувствительных датчиков Мультискан

Размер активной поверхности, мм	20 x 0.5
	10 x 0.5
	6 x 0.5
Темновой ток, А (при E=10 V)	10-10-10-11
Минимальная мощность оптического сигнала (Wmin), W	10 ⁻⁹
Время установления координатного отсчета (at W=10-6 W), s	10-5
Спектральный диапазон λ, nm	200-1000
Чувствительность при λ=650 nm, A/W	0.35
Рабочее напряжение (V), В	5-20

смысле Лебега-Стильтьеса, когда задается «что», а на выходе без сканирования всего массива формируется ответ «где». Выходной сигнал при этом формируется в масштабе аргумента, т.е. напряжения, приложенного к прибору, а не в масштабе фототоков, возникающих под воздействием слабого светового сигнала. Такой подход позволяет перейти от традиционного вычисления координат сигнала в виде соотношения малых фототоков к измерению выходного потенциала, соответствующего достаточно большим величинам приложенного напряжения. Именно это обстоятельство позволяет добиться рекордной разрешающей способности прибора (долей микрометров при длине прибора 20 мм). Координата медианы оптического сигнала автоматически устанавливается как величина выходного напряжения датчика.

Значительный интерес представляет возможность формирования дифференциальных признаков интегральным методом, например, при определении положения слабоконтрастного фронта перепада яркости в присутствии интенсивных шумов. Так, например, в первых экспериментах по измерению силы Казимира только с помощью датчика Мультискан оказалось

374

возможным измерить смещение на 1.5 микрона лазерного пятна диаметром более 1 см с высоким уровнем спекл-шума.

По заказу ВНИИ «Трансмаш» были проведены работы по разработке датчиков Мультискан-Т, технология изготовления и топология которых внедрены в ОАО ЦНИИ «Электрон». Датчики Мультискан-Т использовались в составе танковых прицелов. В результате проведенные на полигоне испытания показали повышение точности стрельбы танков с хода на 40-50%. Приборам «Мультискан-Т» присвоена литера «О1» и они были приняты на вооружение (Письмо ОАО ЦНИИ Трансмаш от 28.11.2008). С 2015 года изделие Мультискан-Т входит в комплектацию прицельного комплекса новейшего танка «Армата». Модифицированная топология Мультискана-ТМ защищена патентом РФ №2399117. В 2015-2016 годах осуществлена разработка новой модификации датчика Мультискан с двойной синтезированной апертурой. Этот датчик обеспечивает снижение на порядок ошибки координатоуказания, обусловленной влиянием неоднородных фоновых засветок на люксамперную характеристику кремниевых фотодиодов. Принцип работы этого датчика защищен патентом РФ №2591302. С 2017 года по настоящее время специалисты ФТИ им. А.Ф. Иоффе курируют крупный ОКР «Фонон-7» в ОАО ЦНИИ «Электрон», в котором разрабатывается модификация датчика с рекордным разрешением порядка 2.5.10-6 от поля зрения датчика. Задачей ОКР является импортзамещение в области элементной компонентной базы нового поколения для систем целеуказания, наведения и корректировки стрельбы, связанных с необходимостью проведения прецизионных измерений координат оптического сигнала – а именно нового поколения систем прицелов. Схема устройства на основе датчика Мультискан, позволяющая добиться разрешения 2.5-10-6 от поля зрения датчика, защищена полезной моделью РФ №176265 от 15 января 2018 г.

Публикации

- Podlaskin, B., Guk, Karpenko, A., «A new type of remote sensors which allow directly forming certain statistical estimates of images,» Proceedings of SPIE Vol. 7830, 78300X-1 - 78300X-12 (2010).
- Elena Guk, Boris Podlaskin "Novel Principle of Optical Signal Sensing Based on the Creation of Signal Statistical Estimates" IEEE Sensors 2011 CONFERENCE, Limerick, Ireland, Proceedings, p.436-439.
- Boris Podlaskin, and Elena Guk. New Optical Sensor with Continuous Field of View for Real-time Signal Processing. Proceedings of MECO 2012, pp. 104-107, Mediterranean Conference on Embedded Computing, June 19th-21st, 2012, Bar, Montenegro. IEEE Catalog Number 978-9940-9436-0-8. ISBN 978-9940-9436-0-8. 2012.
- Boris Podlaskin, Elena Guk, and Alexander Sukharev. Registration technique for detection of optical signal position under intense background illumination. Proceedings of Embedded Computing (MECO) 2014, pp. 232-235, 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing, June 15th-19st, 2014, Budva, Montenegro. Print ISBN 978-1-4799-4827-7, DOI 10.1109/MECO.2014.6862703, 2014, Publisher IEEE.
- Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, А.Г. Оболенсков, А.А. Сухарев «Подавление влияния мощной фоновой засветки на точность координатоуказания оптического сигнала» ЖТФ, т. 85, в. 9, с. 128-132, 2015.
- А.Г. Оболенсков, С.М. Латыев, Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук «Экспериментальные исследования компенсации погрешности координатоуказания оптического сигнала с помощью двойной синтезированной апертуры» Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики, т. 16, № 5, с. 757-763, 2016.
- Подласкин Б.Г.; Гук Е.Г.; Оболенсков А.Г.; Сухарев А.А. «Повышение разрешающей способности позиционно-чувствительного устройства на основе датчика интегрального типа». INTERMATIC -2017, Международная научно-техническая конференция "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения", 20-24 ноября 2017 г., Москва, т.17, №3, с. 846-849, 2017.

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

СИЛОВАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

Базовые структурные подразделения – лаборатории Мощных полупроводниковых приборов и Прикладных проблем сильноточной электроники

В современной энергетике практически во всех странах более, чем 60%, а в альтернативной – ветровой и солнечной – энергетике все 100% вырабатываемой электроэнергии по пути к потребителю проходит через полупроводниковые преобразователи. При таких масштабах преобразования эффективность преобразователей сушественно влияет на эффективность энергетики в целом. Основными активными элементами преобразователя, определяющими его эффективность, являются силовые полупроводниковые приборы. В СССР начало силовой полупроводниковой электронике было положено в середине пятидесятых годов в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, когда в лаборатории В.М. Тучкевича были созданы первые германиевые, а затем кремниевые мощные диоды большой площади. Затем в начале 60-х была создана, совместно с промышленностью, принципиально новая технология изготовления высококачественных кремниевых pn-переходов путем диффузии в кремний алюминия из его окислов в воздушной среде. Простота этого процесса, не требующего сложного технологического оборудования, позволила разработать и быстро организовать производство мощных диодов и тиристоров с параметрами, соответствующих мировому уровню, а масштабы производства позволили полностью удовлетворить потребности всей страны. Созданная в 60х новая отрасль промышленности - производство силовых полупроводниковых приборов – не была разрушена в «перестройке» 90-х годов; современные диоды и тиристоры выпускаются и в настоящее время на двух крупных заводах в Саранске и Орле, а в Институте сейчас близка к завершению работа по созданию нового базового прибора силовой электроники – интегрального тиристора с полным управлением.

Работы в области силовой импульсной электроники в Институте были начаты в конце 70-х годов. К тому времени уже было ясно, что электрические импульсы в диапазоне пиковых мошностей от киловатт до гигаватт и длительностей от десятков пикосекунд до сотен микросекунд будут использоваться как в научных исследованиях, так и в промышленных и оборонных технологиях. В 1979 г. в лаборатории Мощных полупроводниковых приборов был открыт эффект, позволивший на два-три порядка увеличить пиковую мощность, коммутируемую полупроводниковыми приборами в диапазоне времени нарастания тока в десятки пикосекунд [1]. Оказалось, что в высоковольтном диоде при очень быстром, более 1 kV/ns, нарастании блокируемого напряжения, оно возрастает до величины в 1,5-2 раза большей, чем напряжение пробоя в квазистатических условиях, а затем резко падает за время на порядок меньшее времени пролета носителями тока базовой области прибора с предельно возможной — насыщенной, скоростью. Такое сверхбыстрое переключение связано с формированием у рп-перехода фронта ударной ионизации (Рис.1), который перемещается от p/n – перехода к базовому контакту, оставляя за собой электронно-дырочную плазму с высокой концентрацией. Скорость перемещения фронта определяется, в основном, амплитудой импульса перенапряжения и намного превышает насыщенную скорость носителей.

Заполнение плазмой n-базовой области переводит



диод из блокирующего в проводящее состояние; этот процесс является, пожалуй, самым быстрым методом генерации больших объемов электронно-дырочной плазмы в полупроводниках и дает возможность переключить, например, кремниевый диод с блокируемым напряжением 2 кВ в проводящее состояние за 40-50 пикосекунд. Оказалось также, что с помощью ударно-ионизационного фронта можно быстро переключать и более сложные четырехслойные динисторные структуры и формировать мощные импульсы тока с наносекундным фронтом и большой длительностью протекания.

Дальнейшие исследования показали, что длительность процесса восстановления запирающей способности p/n-перехода в высоковольтных мощных диодах при переключении из прямого смещения на обратное и выносе накопленной электронно-дырочной плазмы, составляющая единицы микросекунд в обычных условиях, может быть уменьшена до единиц и даже долей наносекунд, что дает возможность получить скорость нарастания напряжения, достаточную для формирования фронта ударной ионизации. Для этого ширина и уровень легирования p-слоя p⁺p/nn⁺ - структуры, амплитуда и длительность импульса прямого тока, а также скорость нарастания импульса обратного тока должны быть подобраны так, чтобы формирующиеся при протекании обратного тока плазменные фронты в р и n -слоях встретились точно в плоскости p/n – перехода. После этого протекание обратного тока происходит только за счет движения основных носителей с насышенной скоростью от плоскости p/n-перехода, что приводит к формированию области объемного заряда и обрыву тока за единицы наносекунд и даже быстрее. Рабочая плотность обратного тока в этом режиме обычно составляет 0,1 - 0,5 кА/см², рабочее напряжение 0.5-1.5 кВ и время обрыва тока 0.5-2 нс: увеличение плотности тока приводит к значительному увеличению времени обрыва. Работающий в таком режиме диод был назван дрейфовым диодом с резким восстановлением, ДДРВ.

В 1993 г. в Институте электрофизики УрО РАН было установлено, что в сверхглубоком p/n-переходе на кремнии n-типа проводимости при резком, на порядок и более, увеличении плотности обратного тока обрыв его снова становится наносекундным, но физическим механизмом обрыва является образование доменов сильного поля в потоках свободных носителей, выносимых из плазмы; этот процесс был назван SOS-эффектом. Проведённые в ФТИ исследования показали, что диоды на кремнии p-типа проводимости (p-SOS диоды) имеют меньшие коммутационные потери и большее быстродействие, чем n-SOS диоды [2].

Выполненные в последнее время расчеты и эксперименты показали, что полупроводниковые n⁺nn⁺ – структуры без p/n – переходов (кремниевые и ZnSe) при воздействии быстронарастающего импульса перенапряжения (du/dt>10 kV/ns) переключаются в проводящее состояние с высокой плотностью электронно-дырочной плазмы. В принципе, это открывает возможность использования в оптоэлектронике







<u>Company : Megaimpulse</u> Parameters: Pulse rise time– 70 <u>ps</u> Pulse amplitude– 2 kV Max. repetition rate – 100 kHz Company: FID-<u>Tekhnology</u> Parameters: Pulse rise <u>time</u> – 2 ns Pulse <u>amplitude</u> – 50 kV Max. repetition rate –1 МГц

Рисунок 2.

материалов, в которых невозможно создание p/n-переходов [3].

Все эти приборы – лавинный обостритель (ЛО), дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ) и динистор – просты по конструкции и технологии изготовления, а простота их последовательного соединения дает возможность создания высоковольтных генераторов импульсов с пиковой мощностью в десятки и более мегаватт.

Генераторы нано- и субнаносекундных импульсов строятся по такой схеме: импульсы накачки и выкачки ДДРВ формируются мощными тиристорами либо транзисторами, а затем сформированный сборкой ДДРВ наносекундный импульс поступает либо непосредственно в нагрузку, либо предварительно обостряется с помощью сборки диодных обострителей; более мощные импульсы тока с фронтом нарастания в десятки наносекунд и большой амплитудой обычно формируются с помощью динисторных сборок.

На основе этой идеологии была разработана схемотехника генераторов мощных импульсов для целого ряда областей силовой электроники; сейчас такие генераторы довольно широко используются практически во всех развитых странах мира. В качестве примера на Рис. 2 показаны некоторые образцы таких генераторов, выпускаемых в России компаниями «ФИД-Технологии» и «Мегаимпульс» на основе разработок ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Для коммутации больших токов при длительности импульса от миллисекунды и выше обычно используются приборы тиристорного типа, кремниевая четырехслойная n+p/n0n+ - структура которых переводится из блокирующего в проводящее состояние коротким импульсом тока в цепи управления между n+ и р слоями. Включение начинается в небольшой области вокруг электрода управления и медленно распространяется на всю рабочую площадь. Поэтому в субмиллисекундном диапазоне длительностей значительная часть этой площади не успевает включиться. Для работы в этом диапазоне была разработана конструкция структуры, показанная на рис.3.

В этой структуре вместо управляющего электрода в



Рисунок 3.

р+ - эмиттерном слое выполнены равномерно распределенные по площади каналы n+-типа проводимости. Включение прибора осуществляется коротким реверсом внешнего напряжения, при котором по n+- каналам протекает коротким импульс тока, формирующий практически однородно распределенный по площади тонкий слой электронно-дырочной плазмы. Включенный последовательно с тиристором насыщающийся дроссель разделяет на короткое время цепь управления и силовую цепь. После насыщения дросселя на приборе восстанавливается исходная полярность напряжения, внешнее поле вытягивает дырки из плазмы в р- слой, вызывая встречную инжекцию электронов из n+-эмиттера практически однородно по всей площади и однородное и одновременное переключение всей рабочей площади независимо от ее размеров, что позволяет коммутировать очень большие токи: прибор с диаметром кремниевого элемента 101 мм способен переключать ток с амплитудой 0,5 МА при длительности импульса 300 мкс. Этот прибор был назван Реверсивно Включаемым Динистором, РВД. Генераторы импульсов на основе РВД работают во многих странах мира [4].

На рис.4 показан типичный РВД-генератор с диаметром полупроводникового элемента 76 мм; 15



элементов, соединенных последовательно, блокируют напряжение 25 kV; амплитуда тока в импульсе – 300 кА при длительности 300 мкс.

В настоящее время наиболее мощной системой импульсного питания на основе РВД является система питания лазерной установки ЛУЧ-4 в Федеральном ядерном центре (ВНИИЭФ): суммарная энергоемкость конденсаторной батареи 5МДж, суммарный ток в импульсе через РВД–переключатели ~1,3МА. Создаваемая во ВННИЭФ лазерная установка мегаджоульного класса для исследований в области лазерного термоядерного синтеза будет иметь конденсаторную батарею с энергоемкостью 400 МДж; суммарный ток в импульсе через 430 РВД-переключателей будет равен 112 МА при длительности импульса ~300 мкс. Полупроводниковых импульсных систем такого масштаба в мире не существует.

На рис.5 показана конструкция сборки РВД-переключателя. Диаметр кремниевого элемента – 80 мм,



число элементов в сборке – 15, рабочее напряжение сборки 25 кВ, амплитуда импульса тока 300 кА при длительности 300 мкс.

Дальнейший прогресс в области импульсной техники будет, во многом, связан, с разработкой импульсных приборов на основе карбида кремния 4HSiC. Первый такой прибор – высоковольтный импульсный размыкатель ДДРВ – был создан в ФТИ в 2012 г. Р*р/n₀n* - структура этого диода выполнена последовательным эпитаксиальным наращиванием слоев на n+-подложке. После введения плазмы импульсом тока накачки с плотностью ~200 A/см² импульс обратного тока с плотностью 3,5 кА/см² обрывается за время меньшее 300 ps, при этом напряжение на приборе нарастает до ~2kV. Эти параметры существенно выше, чем у кремниевых приборов [5].

Публикации

- Theory of superfast fronts of impact ionization in semiconductor structures, Авторы: Rodin P., Ebert U.; Minarsky A., Grekhov I., 2007, J. Appl. Phys., v.102,3;
- Численное моделирование наносекундного переключения p-SOS-диода, Авторы: Подольская Н.И.; Люблинский А.Г.; Грехов И. В., 2017, ЖТФ, т.87, 12 страницы: 1790-1793;
- High-voltage picosecond-range avalanche switching of semiconductor structures without pn-junctions, Авторы: Brylevskiy V.; Smirnova I.; Podolska N.; Zharova Yu.; Rodin P.; Grekhov I., В книге (сборнике): 2017 IEEE 21ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON PULSED POWER (PPC), страницы: 1-4;
- Мощные коммутаторы на основе реверсивно включаемых динисторов для высоковольтных импульсных технологий, Авторы: Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А., 2014, ПТЭ, т.3 страницы: 58-62;
- Диодные размыкатели тока с субнаносекундным быстродействием на основе 4H-SiC, Авторы: Иванов П. А., Грехов И. В., 2012, ФТП, т.46, 4 страницы: 544-547.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ХОЛОДИЛЬНИКИ

Базовое подразделение – лаборатория Физики термоэлементов

Термоэлектрические преобразователи — холодильники и генераторы, занимают важную нишу в современных технологиях. Термоэлектрические холодильники применяются в системах передачи и обработки информации для термостабилизации оптоэлектронных приборов, в медицине, при производстве микросхем и др. Термоэлектрические генераторы являются единственным источником электроэнергии для космических аппаратов дальнего космоса, и имеют важные применения на земле. Основы современной технологии термоэлектрического преобразования были заложены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Сейчас в институте ведутся работы по созданию и исследованию нового поколения термоэлектрических материалов, которые обеспечивают высокую эффективность преобразования энергии.

Основы современной технологии термоэлектрического преобразования энергии были заложены в Институте в 1930-1960 годах. А.Ф. Иоффе впервые предложил использовать в термоэлектрических преобразователях полупроводники. В середине 30-х годов прошлого столетия он создал первую научную группу по разработке термоэлектрического генератора с использованием полупроводников. Во время Великой Отчественной Войны группа разработала первый термоэлектрический генератор для питания раций («партизанский котелок») с использованием в качестве материала ветвей термоэлементов полупроводник PbS и железо.

Начало 50-х годов прошлого столетия было временем быстрого развития технологии термоэлектрического преобразования. А.Ф. Иоффе разработал теорию термоэлектрического преобразования, ввел параметр безразмерной термоэлектрической добротности материала ZT, который с тех пор является основным параметром для оценки качества термоэлектриков. Было показано, что максимум ZT достигается при определенной оптимальной концентрации носителей заряда, которая находится в диапазоне 2·10¹⁸ — 5·10¹⁹см⁻³ (рис.1). Это значит, что наиболее эффективными термоэлектрическими материалами являются вырожденные полупроводники и полуметаллы. Эта теория была впервые опубликована АН СССР в 1950 г. как секретное издание «Энергетические основы термоэлектрических батарей из полупроводников». В 1954 г. теория была частично опубликована в открытом издании — книге А. Ф. Иоффе «Полупроводники в современной физике» [1]. Затем последовали специальные книги по термоэлектрическому преобразованию и их перевод на английский и японский языки [2,3]. Эти книги до сих пор не утратили своего значения и широко цитируются.







Рис. 2. Температурные зависимости термоэлектрической эффективност сплавов Mg₂Si_{0,4}Sn_{0,6} (1), Mg₂Si_{0,3}Sn_{0,7}Sb_{0.015} (2), Mg₂Si_{0,4}Sn_{0,6}Bi_{0.03} (3), Mg₂Si_{0,55}Sn_{0,4}Ge_{0.05}Bi_{0.02} (4), Mg₂(Si_{0,3}Sn_{0,7})_{0.98}Sb_{0.02} (5).

В это же время были найдены эффективные термоэлектрики: халькогениды свинца, ZnSb, соединения Bi₂Te₃, Sb₂Te₃ и их твердые растворы. Твердые растворы (Bi-Sb)₂Te₃ и Bi₂(Te-Se)₃ до сих пор являются самыми эффективными низкотемпературными термоэлектриками.

В последние годы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработаны новые материалы [4, 5] на основе сплавов Mg₂Si_{1.} "Snx, которые являются одними из лучших среднетемпературных материалов для генераторов с рабочей температурой до 800 К (см. рис. 2). Кроме высокой эффективности сплавы n-типа отличает дешевизна исходных химических элементов, и относительная простота синтеза соединений. Характерная особенность этих сплавов – рекордная удельная термоэлектрическая эффективность (значение параметра ZT на единицу удельного веса), что очень важно для космических применений.

Высокая эффективность термоэлектриков на основе сплавов Mg₂Si_{1-x}Sn_x обусловлена особенностью их электронной структуры. Зонная структура полупроводников Mg₂Si и Mg₂Sn содержит две зоны проводимости: зону легких и тяжелых носителей заряда, разделенных энергетическим зазором ~0.3 эВ. Причем, эти зоны в Mg₂Si и Mg₂Sn инвертированы относительно друг друга. Поэтому в сплаве этих соединений с концентрацией олова х ≈ 0.65 – 0.70 происходит конвергенция зон (рис. 3), и число долин, состояния которых принимают участие в переносе электрического заряда, удваивается. Вместо трех вырожденных долин исходных соединений образуются шесть долин.

В результате такой перестройки зонной структуры при фиксированной концентрации носителей заряда химический потенциал сплава понижается, а термо-ЭДС увеличивается. И, наоборот, при фиксированном химическом потенциале увеличивается концентрация носителей и проводимость. Оба этих процесса значительно увеличивают безразмерную термоэлектрическую эффективность твердого раствора по сравнению с эффективностями сплавляемых соединений.

В последнее время удалось выяснить, что многие хорошие термоэлектрические материалы обладают нетривиальной электронной топологией. Поэтому в лаборатории Физики термоэлементов начаты экспериментальные и теоретические исследования



Рис. 3. Инверсия 2-х зон проводимости в сплаве Mg₂Si_{1.2}Sn₂.



электронной структуры и транспортных свойств топологических изоляторов (к которым принадлежат халькогениды висмута и сурьмы), полуметаллов Вейля и других топологически нетривиальных материалов. Целью этих исследований является выяснение взаимосвязи термоэлектрических свойств и нетривиальной топологии термоэлектриков и на этой основе поиск путей повышения их термоэлектрической эффективности.

В процессе этих исследований, в частности, было выяснено, что зонная структура силицида кобальта CoSi, давно известного своими неплохими термоэлектрическими свойствами, содержит вблизи уровня Ферми новый тип топологически нетривиальных точек касания зон. Расчеты показали, что в Г-точке зоны Бриллюэна находится узел с четырехкратным вырождением зон, а в R-точке – шестикратно вырожденный узел (рис. 4).

Вблизи этих точек касания дисперсия зон линейна и, что более важно, топологические заряды этих узлов аномально велики. Заряды Черна в известных до этого полуметаллах Вейля, Дирака, а так же в мультивейлевских полуметаллах не превышали 3. Топологические заряды в Г- и R-точках силицида кобальта оказались соответственно равными ±4. Если квазичастицы в полуметаллах Вейля описываются тем же уравнением, что и ультрарелятивистские частицы в квантовой теории поля, то квазичастицы в полуметаллическом силициде кобальта не имеют аналогов в релятивистской теории. Нетривиальные топологические состояния в объеме CoSi приводят к появлению необычных поверхностных состояний, называемых дугами Ферми. В поверхностной зоне Бриллюэна эти состояния соединяют проекции Г- и R-точек объемной зоны Бриллюэна. Причем, количество дуг Ферми, исходящих из проекции каждой такой точки равно ее числу Черна. т.е. в рассматриваемом случае - четырем. Распределение плотности поверхностных состояний на уровне Ферми в поверхностной зоне Бриллюэна показано на рис. 5.



Рис. 5. Распределение плотности поверхностных состояний на уровне Ферми (дуги Ферми) в поверхностной зоне Бриллюэна CoSi.



Рис. 6. Однокаскадные и трехкаскадный термоэлектрические модули.

Экспериментальные исследования твердых растворов CoSi, FeSi и NiSi выявили ряд необычных особенностей их термоэлектрических свойств. В сплавах Со, Fe, Si с малым содержанием железа х ≈ 0.04 – 0.06 в области низких температур обнаружены аномально большая теплопроводность и резкое увеличение электросопротивления при возрастании температуры (исчезающее в магнитном поле), причем, величина электросопротивления сплава в десятки раз превышает значения этого параметра в CoSi. Зависимость термо-ЭДС CoSi от концентрации носителей имеет ярко выраженный пик при стехиометрическом составе. Необычны полевые зависимости магнитной восприимчивости. Некоторые из этих особенностей удалось объяснить. Например, резкое возрастание электросопротивления является следствием слабой антилокализации носителей заряда, вызванной нетривиальной электронной топологией. Пик термоЭДС возникает из-за сильной зависимости времени релаксации носителей от энергии в области низкодисперсного участка одной из зон вблизи уровня Ферми в CoSi. Другие выявленные особенности еще ждут своего объяснения.

Работы ФТИ заложили фундаментальные основы для создания термоэлектрической промышленности. Сейчас в России успешно работают несколько компаний, производящих различные термоэлектрические модули и генераторы. Например, однокаскадные и трехкаскадный охлаждающие модули показаны на рис. 6. Среди этих компаний наиболее известны ООО «Криотерм» (С.-Петербург), ООО «Экоген Технолоджи» (С.-Петербург), ООО «РМТ» (Москва, Нижний Новгород) и др. Практически вся их продукция экспортируется.

Термоэлектрические модули находят применение в самых разнообразных устройствах. Наиболее ярким примером являются источники электропитания для космических аппаратов. Например, в СССР 32 спутника серии «Космос» имели на борту энергетические установки «Бук», представляющие собой термоэлектрические генераторы с ядерными реакторами в качестве источников тепла. Советские «Луноходы» были оснащены радиоизотопными термоэлектрическими генераторами (РИТЭГ). РИТЭГи установлены также на американских космических станциях «Voyager-1» и « Voyager-2» и марсоходе «Curiosity».

В ФТИ им. А. Ф. Иоффе создана уникальная измерительная аппаратура для исследования термоэлектрических свойств материалов при температурах от 2 К до 2000 К. Установки позволяют с высокой точностью измерять коэффициент Зеебека, электропроводность, теплопроводность, коэффициент Холла и другие кинетические коэффициенты материалов. Измерительный комплекс ФТИ является признанным мировым эталоном термоэлектрических измерений.

Публикации

- Иоффе А. Ф. Полупроводники в современной физике. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1954.
- Ioffe A. F. Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. London: Infosearch Limited, 1957
- Ioffe A. F. Semiconductors and Their Applications (Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling). Translation of Tamio Sakata. Publishing House Nikkan Kongyou Shonbun-sha. In Japanese, 1957.

- V.K. Zaitsev, M.I. Fedorov, E.A. Gurieva, I.S. Eremin, P.P. Konstantinov, A.Yu. Samunin, and M.V. Vedernikov. Highly effective Mg₂Si_{1-x}Sn_x thermoelectrics. Phys. Rev. B 74, 045207 (2006).
- A. T. Burkov. Silicide Thermoelectrics: Materials for Energy Harvesting. Physica Status Solidi A, 215, 1800105 (2018).
- D.A. Pshenay-Severin, Y. V. Ivanov, A.A. Burkov, A. T. Burkov. Band structure and unconventional electronic topology of CoSi. J. Phys.: Condens. Matter., 30, 135501 (2018).

ТЕРМОЭМИССИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

Базовое подразделение – лаборатория Физической газодинамики

В 21 веке во многих странах мира возродился интерес к термоэмиссионным преобразователям энергии. Связано это с появлением новых актуальных задач в ближнем космосе и в наземных условиях, для решения которых требуются компактные источники электрической энергии с мощностью в сотни киловатт и выше и с небольшими удельными размерами холодильника-излучателя. Для этих целей лучше всего подходят термоэмиссионные преобразователи энергии. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе продолжаются исследования, направленные на создание высокоэффективного термоэмиссионного преобразователя энергии с высокими удельной мощностью и КПД, а также генератора переменного тока на основе такого преобразователя.

В термоэмиссионном преобразователе энергии (ТЭП) осуществляется прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, поскольку здесь нет ни движущихся элементов системы, ни промежуточных ступеней преобразования (например, фазовых превращений рабочего тела). Ток создается за счет эмиссии электронов с горячего эмиттера, а напряжение — за счет разности работ выхода эмиттера и коллектора. Основной путь увеличения проходящего тока – компенсация объемного заряда электронов с использованием ионов легко ионизующихся веществ. Как правило, в межэлектродный промежуток вводят пары цезия. Ионы образуются либо в объеме организацией вспомогательного разряда, либо путем ионизации на поверхности эмиттера. В первом случае реализуется дуговой режим, во втором – бесстолкновительный (кнудсеновский). В дуговом режиме около 0.5 В теряется при получении ионов, в кнудсеновском режиме потерь в плазме нет.

Работы по изучению ТЭП начались в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в конце 1950-х годов. Первые оценки, выполненные А.И. Ансельмом и Н.Л. Добрецовым по инициативе А.Ф. Иоффе, показали перспективность такого источника электрической энергии. Работы по созданию источника электрической энергии на основе ТЭП, нагреваемого от ядерного реактора, в Институте начались в 1960-х годах в связи с идеей использования такого бесшумного источника на атомных подводных лодках.

Испытания полномасштабных ТЭП на реакторе



Рис. 1. Теоретические зависимости максимальной удельной мощности (а) и КПД (б) ТЭП от температуры эмиттера. Поток атомов цезия на поверхность эмиттера F_{cs} = 10¹⁸ см⁻²с⁻¹, d = 1 мм, приведенная степень черноты пары эмиттер-коллектор ε_{nn} = 0.17. Кривая 1 соответствует работе выхода коллектора 1.7 эВ, 2 – 2.2 эВ, • – данные экспериментов.

ВВР-М проводились в г. Гатчина совместно с сотрудниками тогдашнего Гатчинского филиала ФТИ (теперь это Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт"). Многоэлементный ТЭП работал в дуговом режиме на созданной специально для этой цели петле низкого давления. Отрабатывались различные режимы функционирования, и по их результатам была достигнута стабильная удельная мощность порядка 2 Вт/см² на протяжении свыше 200 ч. На основе полученных в ФТИ и других организациях результатах была создана термоэмиссионная ядерная энергетическая установка "ТОПАЗ" космического базирования, которая успешно отработала на орбите в составе советского космического аппарата "Космос-1867" в течение 1987 года.

После завершения работ, связанных с испытаниями термоэмиссионных реакторов-преобразователей, в ФТИ начались исследования процессов, протекающих в кнудсеновском режиме ТЭП, так как с физической точки зрения этот режим наиболее перспективен, поскольку именно в нем при высоких температурах эмиттера реализуются преимущества ТЭП как преобразователя тепловой энергии в электрическую, а КПД преобразования оказывается более высоким, чем в дуговом режиме. На практике данный режим достигается при использовании Cs-Ba наполнения. Компенсация объемного заряда обеспечивается за счет ионов цезия, образующихся на поверхности горячего эмиттера, а необходимая эмиссия электронов – благодаря адсорбции атомов бария на поверхности эмиттера и понижения его работы выхода. Для проведения физических исследований кнудсеновского режима были созданы: стенд, обеспечивающий вакуум не хуже 10-6 тор, экспериментальный прибор с изменяемым межэлектродным зазором d, выбраны материалы деталей прибора, совместимые между собой и с Cs-Ba средой, система регистрации вольтамперных характеристик. В дальнейшем экспериментально была достигнута удельная мощность 15 А/см² и КПД около 20% при температуре эмиттера 2300 К. Проведенные теоретические оценки показали, что кнудсеновский режим можно обеспечить при температурах эмиттера вплоть

до 2600 К [1]. При этом удельная мощность будет достигать 50 Вт/см², КПД – 30% (рис.1), а температуру коллектора можно повысить до ≈1500 К.

Высокая оптимальная температура коллектора ТС кнудсеновского ТЭП позволит сильно уменьшить размеры холодильника-излучателя космической термоэмиссионной энергетической установки, где сброс отработанного тепла может быть осуществлен только излучением. Высокая ТС позволяет в наземных энергетических установках использовать тепло. сбрасываемое с коллектора, для дальнейшего преобразования в электрическую энергию, т. е. создавать гибридные системы. В качестве второго каскада можно, например, использовать бесшумный двигатель с внешним подводом тепла на основе цикла Стирлинга. Высокотемпературный ТЭП обеспечивает КПД 20...30%. КПД двигателя Стирлинга способен превысить 30%. В результате полный КПД двухкаскадного преобразователя должен составить 45...50%. Такой бесшумный источник электрической энергии может быть использован для энергообеспечения подводных лодок, а также в удаленных районах, поскольку он не требует подвоза топлива.

Институтом был предложен проект энергетической установки на основе высокотемпературного Cs-Ва ТЭП, в которой нагрев эмиттера осуществляется с использованием солнечной энергии. Для достижения высоких температур с КПД порядка 90% необходимо так сконцентрировать излучение, чтобы получить в 10 000-20 000 раз большую освещенность. С целью создания столь высокой концентрации было предложено использовать двухступенчатый концентратор, состоящий из параболического зеркала и фокона, входное отверстие которого расположено в фокальной плоскости зеркала. (Фокон представляет собой зеркало специальной формы, у которого внутренняя поверхность образуется путем вращения куска параболы, наклоненного под определенным углом. Основная особенность фокона состоит в том, что он сильно увеличивает плотность солнечной энергии). Эксперименты подтвердили возможность нагрева эмиттера солнечным излучением с использованием только одного параболического зеркала до 1900 К. В экспериментах, проводившихся в США и Японии, с помощью двухступенчатого концентратора удалось достичь температур приемника 2400–2500 К.

Уже в первых экспериментах было обнаружено, что в кнудсеновском режиме ТЭП развиваются нелинейные колебания тока большой амплитуды, имеющие релаксационный характер. Было экспериментально изучено влияние давления паров наполнителей, элементов внешней цепи, а также внешнего магнитного поля на колебания параметров кнудсеновского термоэмиссионного диода. Была создана теория нелинейных колебаний. Согласно этой теории колебательный процесс в кнудсеновском диоде состоит из чередования двух стадий: медленной и быстрой. На медленной стадии происходит перераспределение ионов в межэлектродном пространстве с характерным временем порядка среднего времени пролета ионов между электродами. В определенные моменты этой стадии в плазме возникают условия для возникновения электронной неустойчивости Бурсиана-Пирса. В ходе ее развития распределение потенциала в межэлектродном промежутке сильно изменяется (при практически неизменном распределении ионов), и может произойти резкий обрыв тока. Это и есть быстрая стадия колебательного процесса. Протекает она за время порядка среднего времени пролета электронов между электродами. Обнаруженные нелинейные колебания в ТЭП носят универсальный характер и могут возникать в ограниченной кнудсеновской плазме с пучком электронов независимо от способа генерации ионов. Проведенные в ряде стран эксперименты на кнудсеновских диодах с поверхностной ионизацией подтвердили основные положения теории.

На основе данных об эффекте резкого обрыва тока, возникающего в результате развития неустойчивости Бурсиана-Пирса, сотрудники лаборатории Физической газодинамики предложили два технических решения, позволяющие создавать генераторы переменного тока на основе термоэмиссионного диода:

 – получать переменный ток повышенного напряжения непосредственно из ТЭП,

 преобразовывать постоянное напряжение в переменное без использования дополнительного внешнего управления в специальном диоде-модуляторе [2].

Реализуемость обоих предложений была подтверждена в экспериментах, получены патенты.

В кнудсеновском режиме основные потери связаны с переносом энергии с эмиттера на коллектор за счет излучения. Величина этих потерь пропорциональна приведенной степени черноты ε_{np} пары эмиттер-коллектор, которая и определяет КПД преобразователя в кнудсеновском режиме. В литературе нет надежных данных по определению ε_{np} . В Институте была создана и отлажена методика определения ε_{np} в области высоких температур непосредственно в рабочих ТЭП [3].

При высоких температурах эмиттера возникают два явления, которые могут отрицательно повлиять на выходные характеристики ТЭП как в режиме постоянного тока, так и в режиме переменного тока: собственное магнитное поле электронного тока и рассеяние электронов на атомах наполнителя, приводящие к уменьшению проходящего тока. В последние годы проведено теоретические исследования этих явлений. Было изучено влияние внешнего поперечного магнитного поля на стационарные состояния плоского диода с пучком электронов, движущихся через фон неподвижных ионов во внешнем поперечном магнитном поле. Для получения аналитического решения самосогласованной системы, состоящей из кинетического уравнения для электронов и уравнения Пуассона, был разработан специальный метод. Найдены все стационарные решения задачи. Изучена зависимость решений от величин межэлектродного зазора, концентрации ионов, приложенного напряжения и магнитного

поля, а также их устойчивость [4, 5]. Начаты работы по изучению влияния редких столкновений электронов с атомами на характеристики плоского диода с пучком электронов, движущихся через фон неподвижных ионов [6]. Показано, что уже присутствие редких столкновений электронов сильно влияет на стационарные режимы диода, и это влияние аналогично воздействию поперечного магнитного поля.

Результаты продолжающихся в Институте исследований по термоэмиссионным преобразователям энергии позволят создать новое поколение преобразователей тепловой энергии в электрическую, превосходящее другие подобные устройства по плотности энергии и КПД.

Публикации

- V.I. Kuznetsov, A.Ya. Ender, and V.I. Babanin. On availability of the optimal regimes in a Knudsen Cs-Ba thermionic converter at high emitter temperatures. J. Appl. Phys. 2018. 124. 044502.
- Кузнецов В.И., Бабанин В.И., Пащина А.С. Экспериментальные исследования бессеточного сильноточного модулятора на основе термоэмиссионного диода для космических систем преобразования тока. Космическая техника и технологии. 2017. 1(16). 103/113.
- В.И. Бабанин, А.Я. Эндер. Определение теплофизических параметров проводника по нестационарным электрическим характеристикам при включении тока нагрева. Приборы, 2011. 12(138). 41050
- 4. S. Pramanik, V.I. Kuznetsov, A.B. Gerasimenko, N. Chakrabarti. Time-independent states of a non-neutral plasma diode when emitted electrons are partially turned around by a transverse magnetic field. Phys. Plasmas. 2016. 23. 103105.
- V.I. Kuznetsov, S. Pramanik, A.B. Gerasimenko, and N. Chakrabarti. Stability properties of the steady state solutions of a non-neutral plasma diode when there is a uniform magnetic field along transverse direction. Phys. Plasmas. 2017. 24. 023107.
- S. Pramanik, V.I. Kuznetsov, N. Chakrabarti. Effects of collision on the time-independent states of a non-neutral plasma diode. Phys. Plasmas. 2018. 25. 083512.

ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ

Базовое подразделение – лаборатория Литий-ионных технологий

Литий-ионные аккумуляторы, суперконденсаторы и батареи на их основе нашли широкое применение в различных областях техники, показав ряд существенных преимуществ перед другими перезаряжаемыми химическими источниками тока. Связь, бытовая электроника, транспорт, системы безопасной эксплуатации важнейших объектов являются теми сферами применения, в которых литий-ионные батареи активно вытесняют или уже полностью вытеснили традиционные аккумуляторные батареи. Разработка высокоэнергоемких и высокомощных накопителей электрической энергии на базе литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов необходима для повышения технических и эксплуатационных характеристик автономных энергоустановок, используемых в различных изделиях спецтехники.

В ФТИ им. А. Ф. Иоффе выполнены разработки литий-ионных аккумуляторов и аккумуляторных батарей различного типа на их основе. Примеры созданных аккумуляторов и батарей представлены на рисунках 1 - 3. Разработанные источники энергопитания предназначены для работы в составе электрических транспортных средств, робототехнических комплексов, подводных аппаратов, накопителей электрической энергии для автономных энергоустановок и в возобновляемой



Рисунок 1 – Опытный образец литий-ионного аккумулятора ICNR 34/174/ НР; ном. напряжение: 3,7В; Ном. ёмкость: 7Ач; Макс. ток разряда: 100А; Диапазон рабочих температур: - 40 ÷ 50°С; Масса: 0,35 кг

энергетике. Для обеспечения продолжительной и безопасной эксплуатации разрабатываемые литий-ионные аккумуляторные батареи снабжены встроенными системами контроля и управления [1].

Проводится разработка литий-ионных аккумуляторов, имеющих повышенные мощностные и энергетические характеристики, работоспособных в расширенном диапазоне температур.

С целью создания гибридных литий-ионных конденсаторов (гибрида электрического двойнослойного конденсатора и литий-ионного аккумулятора), проводятся исследования перспективных активных материалов [2].



Рисунок 2 – Опытные образцы литий-ионных аккумуляторов: - ICNP 35/230/210/ НЕ; ном. напряжение: 3,7 В; ном. ёмкость: 160 Ач; диапазон рабочих температур: - 40 ÷ 50° С; Масса: 4 кг.

- ICNP 35/130/170/ НЕ; ном. напряжение: 3,7 В; ном. ёмкость: 65 Ач; диапазон рабочих температур: - 40 ÷ 50° С; Масса: 1,6 кг



Рисунок 3. Стартерная литий-ионная батарея. Область применения - обеспечение запуска двигателя тяжелой транспортной техники. Технические характеристики: Номинальное напряжение 25 В; Номинальная емкость 190 Ач; Максимальный стартерный ток 2500 А; Максимальная мощность 75 кВт; Диапазон рабочих температур: - 40 + 50оС; Масса 47 кг.

Совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПб-ГПУ), с применением метода молекулярного наслаивания, изготовлены аноды литий-ионных аккумуляторов на основе плёнок SnO2. Проведенные исследования показали, что тонкие плёнки SnO2 перспективны для использования в качестве анодов тонкоплёночных твердотельных литий-ионных аккумуляторов. В совместных работах с СПбГПУ показана возможность увеличения ресурса положительных электродов при модифицировании их поверхности тонким покрытием оксида алюминия.

В сотрудничестве с лабораторией Мощных полупроводниковых приборов выполняются работы по исследованию возможностей применения кремния в качестве отрицательных электродов литий-ионных аккумуляторов. Проведены исследования регулярных структур макропористого кремния разной архитектуры: в виде столбиков, зигзага и сетки. Установлено, что критическими параметрами, определяющими скорость деградации макропористого кремниевого электрода, являются состав литированного кремния в конце заряда электрода и размеры исходных кремниевых структур. Показано, что путем ограничения количества внедряемого лития в макропористую кремниевую мембрану можно предотвратить ее разрушение и существенно повысить продолжительность работы электрода [3, 4].

В лаборатории Литий-ионных технологий проводятся исследования перспективных для использования в литий-ионных аккумуляторах катодных материалов со слоистой структурой. Синтезированы обогащенных литием и марганцем катодные материалы, имеющие высокую разрядную ёмкость (>240 мАч/г, при скорости разряда С/4). Совместно с сотрудниками Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова проводится разработка катодных материалов на основе смешанных оксидов переходных металлов со структурой ядро-оболочка. Показано, что увеличение доли марганца в оболочке увеличивает ресурсные характеристики катодных материалов. В состав моноклинной фазы (Li2MO3) оболочки, помимо атомов марганца, могут входить атомы никеля и кобальта.

В проведенных совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом работах исследовано применение проводящего водорастворимого полимера PEDOT:PSS в качестве связующего и электропроводной добавки положительного электрода на основе литированного фосфата марганца и железа (LiFe0,4Mn0,6PO4). Показано, что использование PEDOT:PSS позволяет повысить ресурс и разрядную ёмкость электрода по сравнению с электродами со связующими на основе поливинилиденфторида (ПВДФ). В результате проведенных исследований влияния природы проводящих добавок на работоспособность положительных электродов было установлено, что введение в состав активной массы углеродных нановолокон VGCF, а также нанесение микронного слоя высокорасщепленного графита / ПВДФ на токопроводящую алюминиевую подложку способствуют уменьшению падения напряжения на электроде при повышенных скоростях разряда [5].

Коллективом сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе были синтезированы и исследованы монопористые углеродные материалы полученные методом хлорирования карбидов кремния, титана и бора [6]. Их использование в качестве активных материалов перспективно для создания высокомощных суперконденсаторов с удельной мощностью до 100 кВт/кг и ресурсом более 500 тыс. циклов.

Публикации

- Рыкованов А. С., Жданов В. В. Построение высоковольтных Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника. – 2013. № 3. – С. 64-68.
- Коштял Ю. М., Румянцев А. М., Жданов В. В. Литий-ионный суперконденсатор с электродами на основе углеродных материалов

// Электрохимическая энергетика. – 2015. № 3. – С. 119-129.

- Астрова Е. В., Ли Г. В., Румянцев А. М., Жданов
 В. В. Электрохимические характеристики наноструктурированных кремниевых анодов для литий-ионных аккумуляторов // ФТП. – 2016. – Т. 50, № 2. – С. 279-286.
- Li G. V., Rumyantsev A. M., Levitskii V. S., Beregulin E. V., Zhdanov V. V., Terukov E. I., Astrova E. V. Application of silicon zig-zag wall arrays for anodes of Li-ion batteries // Semiconductor Science and Technology. – 2016. – V. 31, № 1. – P. 8.
- Ежов И. С., Мазин Е. В., Румянцев А. М., Коштял Ю. М., Черепкова И. А., Жданов В. В. Исследование высокорасщепленного графита в качестве электропроводящей добавки в положительный электрод литий-ионного аккумулятора // XV International conference Topical problems of energy conversion in lithium electrochemical systems – Saint-Petersburg, 2018. – P. 93-97.
- Компан М. Е., Малышкин В. Г., Кузнецов В. П., Кривченко В. А., Черник Г. Г. О накоплении энергии в двойном слое на поверхности материалов с малой плотностью электронных состояний. // Электрохимия. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 4-9.

ФИЗИКА ЖИВЫХ СИСТЕМ

РАДИОСПЕКТРОСКОПИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Базовое подразделение - лаборатория Микроволновой спектроскопии кристаллов

Одним из направлений деятельности ФТИ является развитие экспериментальной базы для фундаментальных магнитно-резонансных (радиоспектроскопических) исследований биологических систем. Основной прогресс в создании приборной базы радиоспектроскопии в прошлом и в настоящее время связан именно с биологическими исследованиями, исследованиями живых систем. Методы магнитного резонанса являются чрезвычайно информативными инструментами неразрушающей диагностики биологических систем, при этом микроволновое и радиочастотное излучение, используемое в радиоспектроскопии, проникает внутрь биологических тканей, что дает возможность непосредственно следить за биологическими процессами в условиях окружающей среды.

Спиновые явления играют фундаментальную роль в природе, включая процессы, происходящие в живой материи. На спиновых явлениях основан один из самых мощных аналитических методов исследований метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), открытый Е.К. Завойским в 1944 г., и его развитие в виде электронного спинового эха (ЭСЭ), двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР), оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Объединение ЭПР и ЯМР позволяет вывести информационные возможности магнитного резонанса на совершенно новый качественный уровень, в частности, благодаря усилению сигнала ЯМР через преобразование радиочастотных квантов в микроволновые и далее в оптические кванты позволяет ожидать, что ЯМР томография выйдет на молекулярный и даже атомный уровень получения ЯМР изображения.

Применение ЭПР спектроскопии в биологии и медицине включает:

• исследование природы фотосинтеза, процессов разделения заряда в биологических системах;

 исследование процессов в биологических системах, в протеинах, металло-протеинах, содержащих переходные металлы и их кластеры, динамики и направленности переноса вещества через мембраны в протеинах, изучение возможности контролируемой модификации протеинов для генной инженерии; исследование свободных радикалов, играющих определяющую роль в биологических процессах;

ранняя диагностики раковых заболеваний;

 разработка новых типов лекарств, определение состава лекарственных веществ, срока годности веществ, устойчивости препаратов к воздействию внешних факторов, наличия вредных компонент;

 диагностика последствий воздействия облучения на организм (рентген, радиация, в том числе методы антираковой терапии), использование ЭПР в дозиметрии и био-дозиметрии;

• анализ парциального давления кислорода в биологических объектах, например, в крови.

Важным биологическим применением ЭПР, которое активно развивается в течение десятилетий, заключается в использовании парамагнитных соединений, которые вводятся в исследуемую систему в качестве молекулярных зондов (спиновых меток). Наблюдение за сигналами ЭПР спиновых меток позволяет следить за структурными перестройками биополимеров, макромолекулярных комплексов, биомембран и других надмолекулярных структур клетки.

В современных лабораториях, занимающихся биофизическими, биохимическими и медико-биологическими исследованиями, спектрометры ЭПР



Рисунок 1 - Молодые сотрудники лаборатории Микроволновой спектроскопии кристаллов, которые проводят исследования на созданном в ФТИ радиоспектроскопическом комплексе, включающем высокочастотный спектрометр ЭПР/ЭСЭ/ОДМР и сканирующий зондово-оптический спектрометр магнитного резонанса.

стали незаменимыми рабочими инструментами. Сигналы ЭПР могут служить своеобразными «отпечатками пальцев» (паспортами) для идентификации переносчиков электронов и следить за химическими превращениями. При этом, ЭПР часто является единственным методом наблюдения за окислительно-восстановительными превращениями.

В лаборатории в рамках ФЦП создается новый инновационный радиоспектроскопический приборный комплекс, одно из назначений которого, исследование и неразрушающая диагностика биологических объектов, включая и наноразмерные системы. Комплекс состоит из двух основных систем: (i) спектрометра высокочастотного ЭПР, ЭСЭ, ОДМР и (ii) магнитного резонанса, совмещенного с оптической конфокальной и атомно-силовой микроскопией. Впервые в мировой практике упомянутые спектрометры объединены вместе, что предполагает взаимно усиливающий эффект от такого объединения - эффект синергии.

На рисунке 1 представлены основные узлы радиоспектроскопического комплекса. Высокочастотный спектрометр построен по единому принципу для нескольких рабочих частот (95 ГГц и 130 ГГц) с использованием малогабаритных и унифицированных микроволновых блоков, созданных и запатентованных совместно с российской компанией ДОК, работающих в непрерывном и импульсном диапазонах, магнито-оптического криостата замкнутого цикла, установленного на оптический стол, единого аппаратного и программного обеспечения. Разработана микроволновая квази-резонаторная система, позволяющая получать высокую чувствительность, сравнимую и по некоторым применениям превышающую чувствительность стандартных ЭПР спектрометров.

Совмещение в одном приборе высокого пространственного разрешения атомно-силовой микроскопии (ACM) и конфокальной микроскопии, созданной в компании НТ МДТ, с методами магнитной резонансной спектроскопии (Рис. 1) позволяет получать информацию о спин-оптических свойствах исследуемых объектов в локальном объеме вещества субмикронных размеров, вплоть до регистрации одиночных квантовых



Рисунок 2 - Обнаруженное сотрудниками лаборатории воздействие магнитного поля на процесс высвечивания (послесвечения) в кристаллах и керамиках гранатов на основе магнитных ионов гадолиния.

объектов. Появляется возможность химической идентификации объекта, находящегося под зондом АСМ или в фокусе конфокального микроскопа, включая и STED микроскопию. Основные применения спектрометра: магнитометрия, электрометрия и термометрия с наноразмерным разрешением, что важно для понимания биологических процессов; биологические спиновые и люминесцентные метки; ЭПР и ЯМР с наноразмерным разрешением; источники одиночных фотонов; элементная база для квантовых вычислений, кубиты на основе одиночных спинов и одиночных фотонов в условиях окружающей среды - в результате сняты температурные ограничения на возможность квантовых операций в нервной системе человека. Эти фантастические сценарии стали возможны после открытия уникальных свойств спиновых центров окраски в алмазе и карбиде кремния, в которых под действием оптического возбуждения происходит выстраивание населенностей спиновых уровней в триплетном и квадруплетном состояниях при комнатных температурах и выше [A.Gruber et al., "Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centres", Science 276, 2012-2014 (1997); P.G. Baranov, H.-J. von Bardeleben, F. Jelezko, J. Wrachtrup, "Perspectives of Applications of Magnetic Properties of Semiconductor Nanostructures and Single Defects", pp. 435-518, Chapter 6; Springer Series in Materials Science, Volume 253, (2017)].

Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ) – быстро развивающийся диагностический метод, который основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов и электронов во внутренних органах человека или животного. Решающее значение при создании приборов для ПЭТ (а также приборов для компьютерной томографии – КТ) играет выбор материалов для сцинтилляционных детекторов, веществ, обладающих способностью излучать свет при поглощении гамма-квантов, оптимизация их характеристик. Одним из направлений исследований лаборатории было участие в разработке совместно с фирмой Филипс материалов для ПЭТ и КТ, при этом методы магнитного резонанса играют решающую роль при идентификации центров рекомбинации и излучения в этих материалах. На рисунке 2 приведены полученные в лаборатории эффекты воздействия внутренних магнитных полей на процессы высвечивания сцинтилляторов на основе кристаллов и керамик гранатов, показано, что предполагаемое использование гадолиния изменяет характеристики высвечивания кристаллов и керамик, что может привести к необходимости замены



Рисунок 3 - Блок схема зондово-оптического спектрометра магнитного резонанса, выполненного для исследования и применений спиновых центров окраски в карбиде кремния.

магнитного элемента (Gd) на диамагнитные (Y, Lu).

Рисунок 3 иллюстрирует работу зондово-оптического спектрометра магнитного резонанса. Изменения фотолюминесценции (ФЛ) регистрируются при различных схемах включения магнитных и радиочастотных полей. Применяются методы ОДМР, антипересечения уровней, кросс-релаксации, выжигания провалов в ОДМР под действием двух радиочастот (РЧ) и другие. Показаны две модификации использования карбида кремния для регистрации магнитных и температурных полей: в виде пластины кристалла SiC с центрами окраски (обозначенными V1, V2, V3, V4), помещенного на сканирующий столик микроскопа, или в виде нанокристалла SiC, помещенного на зонд ACM. Внизу показаны населенности спиновых уровней центров окраски, создаваемые оптическим возбуждением.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ, ОПТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ГИДРАТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

Базовое подразделение – лаборатория Физики адсорбционно-десорбционных процессов, разработки ведутся также в лабораториях Физики сегнетоэлектричества и магнетизма, Атомной радиоспектроскопии, Процессов атомных столкновений.

В настоящее время активно разрабатываются новые идеи, основанные на рассмотрении живого организма не только как биохимической машины, но как сложного физического объекта со своими полевыми и кластерными структурами, в которых большую роль играют микроэлементы и изотопные процессы. Такое рассмотрение позволяет использовать новые подходы в медицине и сельском хозяйстве, в том числе при создании аппаратных комплексов и методик для изучения фотосинтетических реакций, механизмов питания и метаболизма растений. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся работы по созданию технических комплексов и исследованию с их помощью изотопных эффектов в живых системах, оптики листьев, биоэлектрических потенциалов растений.

Работы в области физики живых систем, в частности агрофизике, были начаты в Физико-техническом институте АН СССР Абрамом Федоровичем Иоффе еще в 1930 году. В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе на базе лаборатории Физики адсорбционно-десорбционных процессов изучаются вопросы агрофизики и физиологии растений; методы измерения количества и изотопного состава биологически значимых микроэлементов (металломика); развиваются теоретические представления о механизмах гидратации биологически активных молекул.

В свою очередь, работы в области агрофизики ведутся по следующим направлениям: 1) создание лабораторного фитотрона с варьируемыми световыми режимами для выращивания экспериментальных образцов культур; 2) масс-спектрометрический анализ фракционирования изотопов из окружающий среды в углеродный пул и глюкозу тканей растений; 3) спектрометрический анализ поглощения света листьями растений in vivo и светочувствительными пигментами, выделенными из них, 4) регистрация биоэлектрических потенциалов и генерация тока растениями.

Разработан компактный лабораторный фитотрон [1] «SvetOK»– комплекс камер для выращивания растений в регулируемых искусственных условиях с программируемыми светодиодными источниками облучения для изучения влияния физических факторов на растения. Устройство позволяет проводить эксперименты в отношении роли суточной экспозиции, величин фотосинтетического потока PPF, спектра освещения [2] и обеспечивать воспроизводимость результатов биофизических исследований и стандартизовать условия роста и развития растений, используемых как объекты исследования.

Одним из важнейших аспектов в области светокультуры является правильно подобранный спектр, интенсивность и суточная доза облучения. Для выявления механизма поглощения и фотосинтетически активных спектральных диапазонов была предложена методика, основанная на спектрометрических измерениях доли поглощенной энергии светочувствительными пигментами в растворе [3] и поверхностью листьев in vivo. Была разработана методика измерения спектров поглощения пигментов, выделенных из листьев растений, в зависимости от условий освещения. также была разработана система регистрации спектров поглощения света листьями растений in vivo. На биополигоне ФГБНУ АФИ проведено испытание, основанное на регистрации спектров поглощения листьев в ходе их развития при освещении излучением с различным
спектральным составом. Определен оптимальный индекс светопоглощения, отражающий приращение поглощенной энергии на прирост биомассы. Выявлено, что изменение оптических свойств листьев является чувствительным показателем физиологического состояния растения, характеризует его потребности и позволяет провести оценку влияния спектра и интенсивности освещения на эффективность поглощения и переработки световой энергии в химическую.

Для изучения изотопного состава углерода в тканях растений и степени его фракционирования из воздушной среды был предложен ряд методик и создан аппаратный комплекс, позволяющий осуществить пробоподготовку. Для оценки фракционирования изотопов углерода из воздуха в листья растений и наблюдения за характером протекания фотосинтеза с помощью выявления различий изотопных составов глюкозы и комплекса углеродсодержащих соединений в листе растения, была разработана методика, заключающаяся в помещении исследуемого растения в воздухо- и светонепроницаемый объем с циркулирующим по системе ёмкостей газовой смесью. В одной из ёмкостей углекислый газ вымораживался в парах жидкого азота с предварительным обезвоживанием. Затем от анализируемого растения отделялся кусок ткани и из него путем окисления содержащейся в нем глюкозы дрожжами выделялся СО₂. Параллельно такой же кусок ткани растения сжигался в каталитической ячейке с образованием СО₂. Полученный углекислый газ анализировался на специализированном изотопном статическом магнитном масс-спектрометре "Хеликомасс" (см. страница 80) разработки ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Показано, что при фракционировании изотопов из воздуха в листья овса, выращенного под разным освещением, значение $\Delta \delta^{13}$ С меняется в пределах 9-13‰, увеличиваясь при изменении спектра воздействовавшего излучения от теплого белого к синему свету. Разработанная методика позволяет использовать изотопное отношение ¹³C/¹²C как важный показатель скорости

протекания реакции фотосинтеза.

Важной научной и практической задачей является количественное определение и измерение изотопного состава биологически активных микроэлементов в теле человека [4], животных и растений. В ФТИ был предложен новый метод решения этой задачи на основе масс-спектрометрии ЭРИАД – электрораспыления с управляемой атомизацией в источнике [5]. Совместно со специалистами Института аналитического приборостроения РАН и ООО «МС-био» создан прототип масс-спектрометра МИ-20 LowMass (см. страница 80), предназначенного для количественного определения легких элементов, от лития до магния, и для измерения изотопного состава лития.

Важнейшей характеристикой живой системы являются генерируемые ею электрические потенциалы, которые отражают биоэлектрическую активность организма и характер протекания метаболических процессов. Специалистами лаборатории предложен путь создания неивазивных контактов с тканями растений, основанный на идее прорастания корней через электропроводящие сетки. Разработан автоматизированный метод неинвазивной регистрации биоэлектрических потенциалов в режиме реального времени и изучено его изменение в зависимости от внешних условий. Изменение биопотенциалов растений используется как система фитомониторинга, отслеживания состояний растительных организмов и стимуляции их развития. Интересен вопрос о возможности использовать генерируемые биотоки для создания технологии накопления и производства электроэнергии.

Гидратация биополимеров, играющая важную роль в межмолекулярных процессах, происходящих в цитоплазме живой клетки, была рассмотрена с позиции «биополимер в водной среде», учитывающей склонность молекул воды в конденсированной фазе к самоорганизации и их различное взаимодействие с гидрофобными поверхностями и гидрофильными центрами биополимера. Предложена физическая модель гидратации. Показано, что предложенная модель позволяет корректно трактовать экспериментально наблюдаемые свойства водных растворов биоактивных молекул, и может быть использована для математического моделирования гидратации и интерпретации процессов, имеющих место в цитоплазме живой клетки.

Публикации

- Березкина (Кулешова) Т.Э., Блашенков М.Н., Кулешов Д.О., Галль Н.Р. Экспериментальный лабораторный фитотрон с программируемым светодиодным источником для изучения влияния длительности светового дня и спектра излучения на растения // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 129-130.
- Кулешова Т.Э., Блашенков М.Н., Кулешов Д.О., Галль Н.Р. Разработка лабораторного фитотрона с возможностью

варьирования спектра излучения и длительности суточной экспозиции и его биологическое тестирование // Научное приборостроение. 2016. Т. 26. № 3. С. 35-43.

- Кулешова Т.Э., Лихачев А.И., Павлова Е.С., Кулешов Д.О., Нащекин А.В., Галль Н.Р. Взаимосвязь спектров поглощения пигментов растений и светодиодного освещения с различным спектральным составом // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. вып. 9. in press.
- Павлова Е.С., Масюкевич Л.В. Блашенков Н.М., Галль Н.Р. Реализация глюкозо-толерантного теста с помощью измерения изотопного отношения 13С/12С в выдохе человека // ЖТФ. 2018. Т. 88. вып. 9. in press.
- L.N. Gall, N.S. Fomina, R.Giles, S.V. Masukevich, O.A. Beliaeva, N.R. Gall Electrospray mass spectrometry with controlled in-source atomization (ERIAD) as a promising elemental method: evaluation of analytical features // Eur. J. Mass Spectrom. 2015. Vol. 21. № 4. P. 353-359.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВАЖНЫХ ДЛЯ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ МОЛЕКУЛ ЛАЗЕРНЫМИ МЕТОДАМИ

Базовое подразделение – лаборатория Физической газодинамики

Сверхбыстрая лазерная спектроскопия анизотропных молекулярных зондов и синглетного кислорода в биологических средах

Лазерные методы исследования многоатомных молекул уже несколько десятилетий привлекают пристальное внимание исследователей во всем мире в связи с возможностью получения важной информации о динамике возбужденных состояний молекул с высоким временным и пространственным разрешением.

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования в области лазерной спектроскопии молекул в конденсированных средах проводятся в лаборатории Физической газодинамики и Лазерном центре Отделения Физики Плазмы, Атомной Физики и Астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе в течение более чем десяти лет. Эти исследования привели к созданию новых подходов к исследованию молекул, важных для биологии и медицины.

Разработаны и апробированы новейшие лазерные технологии для проведения фундаментальных исследований процессов в биологических средах и клетках, а также исследований генерации молекул синглетного кислорода в биологических растворах, клетках и тканях, в том числе *in vivo*.

Одним из направлений исследований явилось применение одно- и многофотонной лазерной спектроскопии для исследования структуры и динамики молекулярных зондов в биологических растворах и клетках с нано- и пикосекундным временным разрешением.

В частности, создан и апробирован принципиально новый метод двухфотонной двухцветной (2С2Р) спектроскопии флуорофоров в растворах, позволяющий исследовать динамику биомакромолекул с пикосекундным разрешением и обладающий целым рядом преимуществ по сравнению с другими известными методами.

Экспериментальные исследования проводились посредством двухфотонного двухцветного возбуждения поляризованной флуоресценции импульсами лазерного излучения фемтосекундной длительности. В качестве объектов исследования использовались растворы молекул р-терфенил (p-terphenyl, PTP), молекулы индола, молекулы аминокислоты триптофана, 2-methyl-5-t-butyl-p-quaterphenyl (DMQ), NADH.

Основная цель этих исследований – фундаментальные исследования процессов передачи энергии в важных для биологии молекулярных зондах, включая молекулы аминокислот, коэнзимы, синглетный кислород, в растворах, характеризующихся различной полярностью, вязкостью и температурой при лазерном облучении, а также исследование фундаментальной





динамики и механизмов реакций отдельных биологически значимых молекул в растворах и клетках с использованием лазерных методов с нано- и пикосекундным временным разрешением.

На Рис. 1 представлен сигнал затухания флуоресценции в растворе индола, после фемтосекундного лазерного возбуждения.

Для интерпретации полученных экспериментальных результатов была построена квантовомеханическая теория, описывающая взаимодействие многоатомных молекул с поляризованным лазерным излучением. На основе предложенной теории были определены соотношения, связывающие поляризацию флуоресценции, возникающей при двухфотонном двухцветном лазерном возбуждении, с временной динамикой возбужденных состояний молекулы.

В этих исследованиях были определены элементы тензора двухфотонного поглощения исследованных молекул в зависимости от частоты лазерного излучения и определены времена жизни и времена вращательной корреляции соответствующих возбужденных состояний молекул. Полученные экспериментальные данные использованы для исследования структуры и динамики возбужденных состояний молекул в растворах.

Значительное внимание было уделено разработке методик исследования фотофизических свойств фотосенсибилизатора хлоринового ряда Радахлорин, который широко используется в медицинской практике для фотодинамической терапии различных заболеваний. Исследования проводились в водном растворе. Был получен полный спектр люминесценции фотосенсибилизатора в видимой и ближней ИК области спектра, выделена полоса фосфоресценции синглетного кислорода и определен вклад излучения синглетного кислорода в общий сигнал люминесценции в полосе около 1274 нм. На Рис.2 представлен экспериментальный сигнал временной зависимости люминесценции синглетного кислорода на длине волны 1274 нм.



Рисунок 2 - Микросекундная динамика сигнала люминесценции синглетного кислорода на длине волны 1274 нм.

В этих исследованиях были впервые получены спектры люминесценции растворов фотосенсибилизатора Радахлорин в видимой и ИК области и была исследована кинетика затухания люминесценции фотосенсибилизатора и синглетного кислорода с суб-наносекундным временным разрешением и определены соответствующие времена жизни возбужденных состояний [1], а также исследована кинетика фотовыцветания фотосенсибилизатора [2].

В описанных исследованиях также принимали участие также ученые из ведущих учреждений медико-биологического профиля: Института онкологии Минздрава России, г. Санкт Петербург, Института цитологии, г. Санкт Петербург и Института фундаментальных проблем биологии, г. Пущино.

Полученные в результате исследований результаты будут использованы для интерпретации спектроскопических данных из молекулярных зондов, внедренных в биологические макромолекулы (белки), для развития новых методов контроля окислительно-восстановительных процессов в клетках и тканях, для более глубокого понимания процессов генерации синглетного кислорода и процессов защиты живых организмов от активных форм кислорода.

Исследование отклика клеток и клеточных структур на фотодинамическое воздействие и химиотерапию методами цифровой голографической микроскопии и томографии

В ФТИ накоплен большой опыт в области разработки методов и алгоритмов цифровой голографии для исследования различных процессов, происходящих, в том числе, в биологических объектах на клеточном уровне. В частности, был проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов восстановления комплексной амплитуды и на основе этих алгоритмов были созданы программы для восстановления и последующей обработки зашумленных цифровых голограмм неоднородных объектов. Был разработан новый метод обработки цифровых голограмм, отличительной особенностью которого является повышенное пространственное разрешение при фильтрации когерентного и случайного шума. Была создана математическая модель и проведена экспериментальная апробация метода голографической томографии, позволяющего восстанавливать трехмерные распределения показателя преломления в исследуемом объекте, проведена оценка точности этого метода и ее зависимость от случайных и систематических ошибок эксперимента.

Были разработаны и созданы лабораторные установки для регистрации различных процессов методом цифровой голографии, в том числе создан лабораторный цифровой голографический микроскоп с возможностью автоматического сканирования исследуемых образцов. Микроскоп позволяет исследовать клеточные изменения в динамике с разрешением до 1 мкм.

Было показано, что методы цифровой голографической микроскопии могут успешно использоваться для детектирования морфологических изменений в клетках, вызванных фотодинамическим воздействием, и исследования их динамики. В ходе этих исследований было установлено, что последовательность



Рисунок 3 - Распределения фазового сдвига в клетках HeLa до и после фотодинамического воздействия при облучении на длине волны 660 нм с дозами: 15 мВт/см² (1) и 77,5 мВт/см²

операций обработки внеосевых цифровых голограмм существенно влияет на получаемые результаты. Было показано, что при изучении сильно зашумленных объектов с наличием существенных неоднородностей, например биологических образцов, желательно проводить операцию вычитания фазовых распределений до фильтрации шумов на фазовом изображении. Сопоставление амплитудных и фазовых изображений живых и фиксированных клеток показало, что на фазовых изображениях могут быть явно выделены некоторые внутриклеточные структуры клеток ввиду различий в их оптических и морфологических характеристиках. Кроме того была создана программа для определения сухой массы и ее концентрации в живых клетках на основе обработки фазовых изображений отдельных клеток. В ходе мониторинга биологических образцов методом цифровой голографической микроскопии было показано, что с ее помощью удается наблюдать морфологические изменения даже неокрашенных живых клеток, исследование которых с помощью оптической микроскопии затруднительно.

Были проведены эксперименты по мониторингу морфологических изменений живых клеток линии HeLa при фотодинамическом воздействии при разных дозах облучения. Было показано, что при высоких дозах облучения происходит повреждение мембраны клеток с выходом клеточного содержимого наружу. При низких дозах наблюдалось округление клеток, сопровождающееся блеббингом. Проведение стандартных тестов на целостность клеточной мембраны с использованием красителей Акридина оранжевого и Бромистого этидия и наблюдением их флуоресценции в конфокальном флуоресцентном микроскопе подтвердило повреждение мембран клеток в первом случае и их целостность во втором. Полученные данные позволили дифференцировать пути клеточной гибели при разных дозах облучения [3]. При этом метод цифровой голографической микроскопии позволил численно оценить скорость протекания внутриклеточных процессов благодаря анализу временной зависимости среднего фазового набега, внесенного клеткой. Было показано, что клетки разных клеточных линий (HeLa и A549) демонстрируют одинаковые реакции на фотодинамическое воздействие, однако, возникающие при существенно разных дозах облучения [3]. Клетки линии А549 оказались заметно более устойчивыми к фотодинамическому воздействию.

На рис. 3 приведены примеры распределений фазового сдвига в клетках HeLa до и после фотодинамического воздействия при малой (1) и большой (2) дозе облучения. Как видно, в первом случае наблюдается увеличение среднего фазового сдвига и уменьшение площади клетки на подложке. Во втором случае наблюдается уменьшение среднего фазового сдвига, сопровождающееся расплыванием клеток.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости динамики изменения фазового набега в клетках НеLa при различных плотностях мощности облучения



Рисунок 4 - Динамика изменения среднего фазового набега в клетках HeLa при различных дозах облучения.

лазером на длине волны 660 нм [3]. Время облучения составляло 5 минут. Было показано, что в зависимости от дозы облучения могут реализоваться существенно разные сценарии изменения морфологических параметров клеток. При низких дозах клетки «ошариваются», их толщина увеличивается, наблюдается интенсивный блеббинг и уменьшение площади соприкосновения клетки с подложкой. При этом сохраняется сухая масса клеток, их мембрана остается неповрежденной. Эти данные позволяют сделать вывод о преобладающем пути гибели клеток апоптозом. При высоких дозах облучения происходит достаточно быстрое уменьшение фазового набега, сопровождающееся уменьшением толщины клетки, потерей сухой массы, нарушением целостности мембраны и выходом клеточного содержимого наружу.

Был разработан и апробирован голографический

метод определения высоты и интегрального показателя преломления клеток фиксированных образцов, основанный на регистрации цифровых голограмм препарата в двух средах с различными показателями преломления. Было проведено вычисление теоретических погрешностей определения толщины и показателя преломления клетки в каждой точке и их зависимость от условий эксперимента. Было показано, что благодаря исследованию обезвоженных фиксированных клеток удается повысить точность определения показателя преломления более чем в пять раз по сравнению с точностью изменения этой величины у живых клеток.

Имеющийся в Институте опыт в голографических исследованиях постоянных клеточных линий человека и мыши HeLa, A549, 3T3, культур мезенхимальных стволовых клеток и макрофагов, а также в изучении реакции клеток на фотодинамическое воздействие с применением фотосенсибилизатора Радахлорин позволили перейти к исследованию клеточного материала, взятого у конкретных пациентов на различных этапах лечения. Такие персонифицированные исследования позволят выявить особенности реакции клеток разных пациентов, страдающих одним и тем же видом рака, а также проследить изменения жизнеспособности клеток одного и того же пациента на разных этапах проведения терапии, в том числе вызванных фотодинамической терапией крови.

Публикации

- M. E. Sasin, A. G. Smolin, K.-H. Gericke, E. Tokunaga, O. S. Vasyutinskii, "Fluorescence anisotropy in indole under two-photon excitation in the spectral range 385–510 nm", PCCP, 2018, DOI: 10.1039/c8cp02708k
- V.P. Belik, I.M. Gadzhiev, M.V. Petrenko, M.A. Petrov, I.V. Semenova, O.S. Vasyutinskii. Visible to near IR luminescence spectrum of Radachlorin under excitation at 405 nm. Chemical Physics Letters, v.665, pp. 127-130 (2016).

- V. P. Belik, I. M. Gadzhiev, I. V. Semenova, O. S. Vasyutinskii. Time-resolved spectral analysis of Radachlorin luminescence in water, Spectrochimica Acta, Part A-Molecular Biomolecular Spectroscopy, v.178, pp. 181-184 (2017).
- D. M. Beltukova, I. V. Semenova, A. G. Smolin, O. S. Vasyutinskii. Kinetics of photobleaching of Radachlorin photosensitizer in aqueous solutions, Chemical Physics Letters, 662, 127–131 (2016).
- A. V. Belashov, N. V. Petrov, and I. V. Semenova. Accuracy of imageplane holographic tomography with filtered backprojection: random and systematic errors. Applied Optics, v.55, 1, 81-88 (2016).
- A. V. Belashov, A. A. Zhikhoreva, T. N. Belyaeva, E. S. Kornilova, N. V. Petrov, A. V. Salova, I. V. Semenova, O. S. Vasyutinskii. Digital holographic microscopy in label-free analysis of cultured cells response to photodynamic treatment, Optics Letters, 41, 21, pp. 5035-5038 (2016).
- A. V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, V.G. Bespalov, N.T. Zhilinskaya, V.I. Novik, I.V. Semenova, O.S. Vasyutinskii. Refractive index distributions in dehydrated cells of human oral cavity epithelium. Journal of the Optical Society of America B, Vol. 34, No. 12 (2017)

МНОГОФУКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНЕЗЕМА Для систем тераностики онкологических заболеваний

Базовое подразделение - лаборатория Физики аморфных полупроводников

В последние годы в медицине активно развивается новый подход к лечению онкологических заболеваний, получивший название тераностика, заключающийся в создании препаратов, которые объединяют в себе как терапевтическую, так и диагностическую функции. С помощью многофункциональных систем для тераностики на основе композитных наночастиц возможно осуществлять диагностику, адресную доставку токсичных химиопрепаратов, не нанося вреда здоровым тканям организма, проводить мониторинг доставки лекарств и результатов проведенной терапии.

При разработке систем тераностики используются

различные типы органических и неорганических наночастиц. Особое место занимают частицы из мезопористого кремнезема (mSiO₂), которые благодаря своим уникальным свойствам (большие удельная поверхность и объем пор, внутренняя подсистема наноканалов одинакового диаметра, возможность получения и контролируемого варьирования размера монодисперсных частиц, возможность функционализации химически активной поверхности, биосовместимость) являются идеальной матрицей для создания многофункциональных систем на основе композитных наночастиц для применения в тераностике.



Рисунок 1 - Схема синтеза монодисперсных сферических частиц мезопористого кремнезема

Нами развиты методы темплатного синтеза (рис. 1) монодисперсных сферических частиц mSiO2 с контролируемым диаметром (в диапазоне 50-500 нм) и монодисперсными канальными мезопорами (в диапазоне 2-10 нм). Показано, что частицы состоят из кластеров (размер приблизительно 15 нм) плотноупакованных трубок кремнезема с толщиной стенки приблизительно 0.5 нм [1]. Среднеквадратичное отклонение размеров, получаемых нанокомпозитных частиц на основе mSiO2 не превышает 10 %. Монодисперсность частиц обеспечивает их одинаковые гидродинамические свойства в системе кровообращения и, следовательно, контролируемое время доставки лекарственных препаратов.



Рисунок 2 - Добавление при синтезе частиц мезопористого кремнезема дополнительного структурообразующего агента приводит к формированию микропор, расположенных в стенках трубок кремнезема (тип 1) и между их внешними поверхностями (тип 2).



Рисунок 3 - Схема получения гибридных частиц mSiO₂/Fe₂O₂@mSiO₂

Методом химического травления в автоклаве получены монодисперсные сферические частицы кремнезема, содержащие крупные мезопоры (более 10 нм) и макропоры (до 100 нм) [2]. Разработан метод введения в поры молекул глобулярного белка миоглобина. Метод заполнения основан на высокой адсорбционной способности развитой внутренней пористой структуры частиц.

Синтезированы микро-мезопористые частицы, обладающие рекордным для кремнеземов значением удельной поверхности пор до 1600 м²/г [3]. Частицы состоят из плотноупакованных трубок кремнезема и имеют две подсистемы пор: цилиндрические мезопоры с контролируемо варьируемым средним диаметром (2,5-4 нм) и микропоры (менее 2 нм), расположенные в стенках трубок и между их внешними поверхностями (рис. 2). Среднеквадратичное отклонение диаметров не превышает 10 %.

Разработан одностадийный метод синтеза мезопористых частиц, которые обладают широкополосной фотолюминесценцией (ФЛ) в видимой области спектра. Для придания мезопористым частицам кремнезема люминесцентных свойств в процессе синтеза в реакционную смесь добавляется другой структурообразующий агент, который встраивается в формирующийся мезопористый кремнезем. В спектре ФЛ частиц наблюдается широкая полоса в районе 480 нм с шириной на полувысоте приблизительно 180 нм. Наблюдаемая ФЛ может быть обусловлена излучением оксикарбидов кремния, формирующихся в результате терморазложения дополнительного структурообразующего агента. Полученные частицы, обладающие ФЛ в видимой области спектра и имеющие развитую внутреннюю поверхность и доступный для заполнения лекарственными препаратами объем пор, перспективны

для создания наноконтейнеров для токсичных химиотерапевтических препаратов, одновременно обладающих функцией люминесцентного маркера.

Получены флюоресцентные монодисперсные сферические частицы кремнезема, содержащие краситель родамин 6Ж внутри пор [4]. Разработана методика покрытия флюоресцентных мезопористых частиц кремнезема, содержащих краситель, различными оболочками и исследована кинетика выхода родамина 6Ж из пор. Частицы с медленной кинетикой выхода родамина (>400 час) могут использоваться в качестве биомаркеров, из которых выход красителя по пути к исследуемым больным органам нежелателен. Монодисперсные сферические мезопористые частицы кремнезема, демонстрирующие (на примере родамина 6Ж) более быструю кинетику высвобождения органических веществ из пор (1-100 час), могут найти применение в качестве средств доставки токсичных лекарственных препаратов. Управление кинетикой выхода транспортируемого агента посредством создания частиц с заданной морфологией позволит контролируемо варьировать дозировку и время воздействия препарата на пораженные участки организма человека, например, при химиотерапии рака.

Синтезированы гибридные частицы со структурой ядро-оболочка, представляющие собой



Рисунок 4 - Функциональность гибридных нанокомпозитных частиц mSiO₂/Gd₂O₂:Eu³⁺@mSiO₂

монодисперсные сферические частицы mSiO², заполненные магнетитом (Fe³O⁴) и покрытые оболочкой mSiO₂, функционализированной биологически совместимым люминесцентным красителем флуоресцеин изотиоцианатом (FITC) [5]. На рис. 3 схематично представлен процесс получения частиц со структурой ядро-оболочка (mSiO₂/Fe₃O₄@mSiO₂).

Частицы имеют низкое среднеквадратичное отклонение размеров (не более 10 %), обладают удельной поверхностью и объемом пор до 250 м²/г и 0.15 см³/г, соответственно, и люминесценцией в видимой области спектра с максимумом на длине волны 530 нм. Полученные гибридные частицы могут найти применение в качестве лекарственного средства для противоопухолевой терапии (как средство для магнитной гипертермии и как контейнер для токсичных химиопрепаратов в системах адресной доставки лекарств). Вместе с тем, такие частицы одновременно могут выступать в качестве многофункционального диагностического средства (как Т2-контрастное средство при проведении магнитно-резонансной томографии (МРТ) и как люминесцентный маркер).

Разработан метод получения гибридных нанокомпозитных частиц типа «ядро-оболочка» на основе mSiO2 и оксидов гадолиния и европия [6]. Частицы представляют собой ядро из mSiO₂ с введенным в поры Gd₂O₃:Eu³⁺ (mSiO₂/Gd₂O₃:Eu³⁺), покрытое оболочкой мезопористого кремнезема (mSiO₂/Gd₂O₃:Eu³⁺@ mSiO₂). На рис. 4 проиллюстрирована функциональность полученных гибридных нанокомпозитных частиц mSiO₂/Gd₂O₃:Eu³⁺@mSiO₂.

Инкапсуляция Gd₂O₃:Eu³⁺ в частицы mSiO₂ обеспечивает возможность их использования в диагностике опухолей методом MPT с контрастом, а также в нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей. Благодаря наличию ионов европия частицы могут применяться в спектроскопической диагностике как твердотельные люминесцентные биомаркеры. Мезопористая оболочка позволит применить данные частицы в качестве наноконтейнеров для токсичных химиотерапевтических препаратов.

Публикации

- E.Yu.Trofimova, D.A.Kurdyukov, S.A.Yakovlev, D.A.Kirilenko, Yu.A.Kukushkina, A. V.Nashchekin, A.A.Sitnikova, M.A.Yagovkin, V.G.Golubev. Monodisperse spherical mesoporous silica particles: fast synthesis procedure and fabrication of photonic crystal films. Nanotechnology, v.24, p.155601-1-11 (2013)
- Е. Ю.Стовпяга, С. А.Грудинкин, Д. А.Курдюков, Ю. А.Кукушкина, А. В. Нащекин, В. В.Соколов, D. R.Yakovlev, В. Г.Голубев. Монодисперсные сферические мезо-макропористые частицы кремнезема: синтез и ад-сорбция биомакромолекул. ФТТ, т.58 (№11), с.2256-2261 (2016).
- 3. D.A.Kurdyukov, D.A.Eurov, D.AKirilenko, J.A. Kukushkina, V.V. Sokolov, M.A.Yagovkina, V.G.Golubev. High-surface area

spherical micro-mesoporous silica particles. Microporous Mesoporous Mater., v.223 (№3), p.225-229 (2016)

- Д. А.Еуров, С. А.Грудинкин, Д. А.Курдюков, А. В. Медведев, Е. Ю.Стовпяга, В. Г.Голубев. Безактиваторные люминесцентные наноконтейнеры для тераностики раковых опухолей. ПЖТФ, т.41 (№19), с.1-8 (2015).
- Д. А. Еуров, Д. А. Курдюков, А. В. Медведев, Д. А. Кириленко, D. R. Yakovlev, В. Г. Голубев. Монодисперсные частицы со структурой ядрооболочка из магнетита и функционализированного люминофором мез-опористого кремнезема. ПЖТФ. т.43 (№15), с.65-72 (2017)
- D.A.Eurov, D.A.Kurdyukov, D.A.Kirilenko, Yu.A.Kukushkina, A. V.Nashchekin, A. N.Smirnov, V. G.Golubev. Core-shell structured monodisperse spherical mSiO₂/Gd₂O₃:Eu^{3*}@ mSiO₂ particles potential as multifunc-tional theranostic agents. J. Nanopart. Res., v.17, p.335303-(1-10) (2015).

МЕДИЦИНСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УГРОЗ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ОРГАНИЗМА В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ

Базовое подразделение – лаборатория Новых неорганических материалов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, разработки ведутся совместно с Северо-Западным государственным медицинским университетом им. И.И. Мечникова и Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого

Оперативная оценка динамики общего состояния организма в условиях экстремальных ситуаций, дефицита времени и возможностей традиционной клинической диагностики "по органам и системам", показатели которых в целом насчитывают более 3000 параметров, требуется для неинвазивной диагностики и упреждающего выявления критических угроз жизни пациентов в отделениях интенсивной терапии, реанимации и хирургии, а также при диспансеризации населения, ведении беременных, медицинском обеспечении спортсменов, военных, спасателей, операторов сложных систем и вахтового персонала. Альтернативным подходом к решению этой задачи является использование обобщенных интегральных показателей функционирования организма, отражающих его общую жизнеспособность и адаптацию при различных внешних и внутренних нагрузках, патологических и возрастных изменениях. Подход, развиваемый в ФТИ им. А.Ф. Иоффе совместно с сотрудниками СЗГМУ им. И.И. Мечникова и СПбПУ Петра Великого, ориентирован на экспрессную оценку интенсивности регуляторных воздействий на метаболизм на основе энтропийно-фрактального анализа стандартных биомедицинских сигналов по информационной насыщенности процессов управления гомеостазом, отражаемых в вариабельности его физиологических ритмов с симбиозом детерминированных и хаотических составляющих фрактальной структуры.

В критических ситуациях, возникающих в результате действия на организм агрессивных внешних и/или внутренних факторов, компенсаторные механизмы ауторегуляции организма не обеспечивают постоянство внутренней среды (гомеостаз) и в процессы обмена энергии и вещества (метаболизм) вовлекаются не только все резервы энергетических веществ организма, но и структурные белки, липопротеиды и полисахариды. При этом сокращаются функциональные возможности органов, нарушается кислотно-основной баланс и электролитное состояние внутренней среды в клеточном, внеклеточном и внутрисосудистом пространствах, инактивируются ферментные системы и передача регуляторной информации, нарушается управление другими функциями и структурами.

Для экстренной оценки состояния организма может эффективно использоваться интегральная оценка приспособительных процессов адаптации организма к внешним и внутренним факторам. Исследование этих процессов. начиная от канадского физиолога Ганса Селье. который считал главной целью живого организма его выживание, достигаемое постоянным процессом приспособления, исторически сосредоточено в двух направлениях. Первое представлено биохимическими критериями (уровни катехоламинов, глюкокортикоидов, гормонов щитовидной железы и тропных гормонов гипофиза, концентрации в плазме энергетических субстратов - глюкозы и свободных жирных кислот и т.д.). Второе направление включает физиологические показатели, в основном отражающие соотношение активности регуляторных систем, прежде всего симпатической и парасимпатической (кожно-гальванический рефлекс И.Р. Тарханова, индексы Р.М. Баевского, І. Кérdö, кардиоинтервалография и др.). Анализ причинно-следственных связей в механизме адаптации показывает, что конечной целью обоих векторов адаптационных процессов является изменение энергетического метаболизма к меняющимся условиям внутренней и внешней среды. Приспособление может быть морфологическим со сравнительно медленным, например, возрастным изменением формы, структуры и физиологии наших органов, а может быть и острой функциональной реакцией на стрессовую ситуацию с полной мобилизацией энергетических и регуляторных ресурсов организма для его выживания. В острой стадии

адаптация всегда сопровождается перестройкой энергетического метаболизма с ростом энергетических затрат и связана с изменением соответствующих регуляторных воздействий, т.е., энергозависима в отличие от хронической адаптации, носящей преимущественно структурный, морфологический характер. Интенсивность острой адаптации, следовательно, может быть оценена по уровню получения и использования энергии, а также сопутствующего изменения энтропии в качестве меры ее диссипации и критерия термодинамической эволюции организма.

Начало таких исследований восходит к калориметрическим опытам Лавуазье и Лапласа XVIII века по изучению связи между образованием тепла и дыханием (потреблением кислорода) у животных, продолженным в XIX веке русским физиологом А. Студенским, и особенно активно развиваемым в середине XX века в связи с практическими проблемами обеспечения теплообмена в скафандрах космонавтов, медицинских барокамерах и т.п. К настоящему времени в этом направлении выявился ряд существенных особенностей. Обнаружилось, что при отклонениях от стабильного состояния, то есть в развивающемся и увядающем организме, также как и в зрелом организме при различных патологиях и болезнях наблюдаются нерегулярные расхождения прямой калориметрии и непрямой (по балансу дыхания). Отдача теплоты на единицу массы тела не остается постоянной - сначала наблюдается резкий подъем или спад кривой потери тепла, а затем ее выравнивание до минимального значения. Однако мониторинг баланса внутреннего производства и обмена с внешней средой термодинамической энтропии как физической характеристики диссипации энергии во времени по этому методу требует учета динамики энергетического метаболизма при значительных отклонениях от нормального или стандартного обмена. Для этого необходимо специальное инструментальное оснащения, в том числе, по измерению потребления кислорода, производства работы и выделения теплоты человеком с использованием высокочувствительного динамического калориметра, отсутствующего в числе серийно изготавливаемого и сертифицированного медицинского оборудования. Невыполнимость прямой калориметрии в реальных условиях клиники побуждает исследователей к методу непрямой калориметрии (по дыхательному газообмену), доступной сегодня в компьютеризированном online варианте (т.н. метаболографический мониторинг). Очевидным ограничением здесь является условие состоятельности эффекторного звена энергетического метаболизма. т.е. сохранности транспорта и утилизации кислорода и энергетических субстратов, которое может существенно нарушаться в онтогенезе, развитии различных патологических процессов и, особенно, в критических состояниях. Это стимулирует разработку альтернативных направлений интегральной оценки физиологического состояния и прогнозированию угроз жизнеспособности целостного организма, в том числе, в критических ситуациях, в частности, на основе энтропийной оценки интенсивности регуляторных воздействий на метабопизм.

К настоящему времени в ФТИ развит метод экспресс-анализа информационной насыщенности процессов регуляции энергетического метаболизма и управления гомеостазом, отражаемых в вариабельности его физиологических ритмов, в частности, ритмов сердца. Изучение последних началось в 50-60 годах XX века в СССР при развертывании советской космической программы, когда феномен вариабельности сердечного ритма (ВРС) отметили у первых собак, запущенных в космос, затем у космонавтов. Наряду с космическими исследованиями и независимо от них феномен ВРС в те же годы активно изучался ленинградскими акушерами при исследовании состояния плода у беременных женщин. Затем исследования ВРС различными математическими методами стали активно развиваться в мировых физиологических исследованиях, в клинической и спортивной медицине, но локализовались на изучении патологий регуляции сердечно-сосудистой системы. Рекомендации по стандартам измерения, физиологической интерпретации и клинического использования ВРС, сделанные в 1996 г. Европейским Обществом Кардиологии и Североамериканским Электрофизиологическим Сообществом, закрепили данный подход в качестве наиболее перспективного при неинвазивной диагностике патофизиологических состояний и для улучшения оценки риска в современной кардиологической практике. Однако при этом изначальная задача в отношении оценки состояния целостного организма более не рассматривалась и даже не ставилась за исключением потребностей врачей-реаниматоров и анестезиологов. Как следствие, стандартно используемые методы и их программные реализации для математической обработки ВРС (статистические, спектральные, корреляционные и др., связывающие плотность распределения флуктуаций. волновую структуру и спектр мощности ВРС с характеристиками других физиологических ритмов, обычно в предположении их стационарности и эргодичности), не позволяют адекватно отслеживать изменения общего состояния целостного организма в динамическом режиме реального времени сообразно развитию различных патологических процессов, особенно, в критических состояниях.

Развиваемый в ФТИ новый подход к решению этой задачи основывается на синергетической концепции самоорганизации взаимосвязанного функционирования всех органов живого организма, взаимодействие которых отражается в вариабельности их физиологических ритмов с сочетанием детерминированных и хаотических составляющих самоподобной (фрактальной) структуры. Стохастическая иррегулярность таких объектов проявляется в виде притягивающего множества фазовых траекторий (т.н. странного аттрактора), который обладает дробной (фрактальной) размерностью, отражающей неэвклидову зависимость между скоростью увеличения элементов фрактала и увеличением интервала масштабов, на котором они рассматриваются. Фрактальность обнаруживается во всех стандартных биомедицинских сигналах (электрических потенциалов сердечных сокращений и деятельности мозга, акустики дыхания,

дрожания конечностей, колебаний химических потенциалов поверхностей раздела ткань-жидкость и др.), а их энтропийная оценка является общей для всей совокупности физиологических процессов – ритма сердца, паттерна дыхания, моторики желудочно-кишечного тракта, электрической активности нейронов и т.д. Это позволяет характеризовать сложные физиологические процессы показателем их энтропийно-фрактальной размерности - ранним весьма чувствительным диагностическим признаком нарушений общей устойчивости функционирования организма, интегрально отображающим физиологическое состояние и эволюцию живой системы.

При дефиците времени целью является не выявление причин этих нарушений, а их следствий для опасного изменения ауторегуляции внутренней среды и обмена веществ. Предлагается использовать экспресс-анализ интенсивности адаптационной регуляции энергометаболических процессов в организме по активности воздействий на них эндокринной и нервной систем, отражаемой в вариабельности физиологических ритмов с симбиозом детерминированных и хаотических составляющих самоподобной «фрактальной» структуры на любых масштабах разрешения различных биомедицинских сигналов, прежде всего, ЭКГ и ЭЭГ. Источником диагностических данных в их вариациях являются «аттракторные» отображения одновременно величины и скорости изменения генерируемой при этом информационной энтропии, реконструкция которых во временных рядах стандартных измерений осуществляется по теореме Такенса. «Плотность» их заполнения качественно отражает динамику общего состояния организма с переходом от устойчивой формы «тугого клубка» для здорового молодого организма, его «разрыхления» при старении и болезнях вплоть до критического вырождения в отдельные «петли» для умирающего. Для количественной оценки масштабной инвариантности энтропийного аттрактора используются вероятностные мультифрактальные размерности, общим выражением которых при дискретных измерениях является размерность Реньи, переходящая в частных

случаях в известные выражения Колмогорова–Синая– Хаусдорфа–Шеннона. На этой основе с учетом известной неопределенности понятий «норма» и «патология», а также приоритета упреждающей оценки развития критических состояний, выявление и прогнозная оценка напряженности угроз ведется по тренду фрактальной размерности аттрактора энтропии, плотность генерации которой в системе взаимосвязанных органов интегрально отражает эволюцию состояния организма в целом.

Развитие предлагаемых методов и средств оценки общего физиологического состояния организма для медицинских приложений данной технологии как в условиях отделений реанимации и хирургии, так и внеклинических условиях резко меняющихся психофизических нагрузок на человека при выполнении им служебных обязанностей, в т.ч., связанных с угрозой жизни, при совместном использовании исходных сигналов различных частотных диапазонов и физической природы с целью исследования характерного времени прогнозирования поведения системы и возможного изменения физиологических механизмов ее регуляции в критических ситуациях создает возможность занятия новых ниш для отечественных производителей мониторов экспрессной интегральной оценки и прогнозирования угроз критических состояний человека.

Публикации:

- Данилевич Я.Б., Коваленко А.Н, Носырев С.П. Иррегулярность энтропийных процессов в организме как показатель его функциональной устойчивости. ДАН. 2009. 429 [1].135-138.
- Носырев С.П., Коваленко А. Н. Основания анестезиологии и реаниматологии. М.: Ключ–С, 2014. 216 с.
- Лебединский К.М. Глава 18 в кн.: Кровообращение и анестезия. С. 950-979. / Коллектив авторов под ред. К.М. Лебединского. 2-е изд. СПб.: Человек, 2015. 1076 с.
- V.Antonov, A.Kovalenko, A.Zagajnov. The Research of Fractal Characteristics of the Electrocardiogram in Real Time Mode. J. Mathematics and System Science. 2012.2[3].191-195.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФТИ им. А.Ф. Иоффе вступает во второе столетие и берёт с собой самое главное, что было создано и сохранено в течение первых 100 лет – целеустремленность в познании законов природы, традиции доведения результатов фундаментальных исследований до готовых технологий и приборов, поддержку научных школ по широкому спектру физико-технических тематик.

Перед Институтом стоят задачи подготовки нового поколения молодых учёных для существующих научных школ, обновления парка научного и технологического оборудования. Особое место в будущем Физтеха должен занять сооружаемый в настоящее время НИОКР-центр, ориентированный на углубление связей Института с промышленностью путем создания на его базе технологий промышленного уровня, пригодных для применения при серийном производстве приборов и устройств.

Решение этих задач позволит реализовывать основную миссию Института – осуществление крупных научных проектов в целях развития и совершенствования инновационной промышленности страны.

Приглашаем во Второй век Физтеха, будет интересно!

СОДЕРЖАНИЕ

Век ФТИ	3
Физтех сегодня	6
Основные направления научных исследований и разработок	6
Интеллектуальный потенциал	17
Структура ФТИ	20
Инженерно-техническая инфраструктура	22
Научная инфраструктура	24
Федеральный центр коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях»	24
УНУ Сферический токамак Глобус-М2	30
Уникальная научная установка «Циклотрон ФТИ им. А.Ф. Иоффе»	36
Комплекс эпитаксиальных технологий	
Комплекс планарных технологий	45
Криомагнитная система	49
Научно-технологический комплекс по созданию литий-ионных аккумуляторов	50
Научно-технический комплекс «Лазерные и оптические исследовательские технологии»	52
Многофункциональный оптический комплекс	52
Оптический комплекс для исследований в области квантовой фотоники	57
Комплекс оптической спектроскопии с фемтосекундным временным разрешением	61
Исследовательский комплекс комбинированного применения методов сканирующей зондовой микроскопии и оптической спектроскопии для изучения структурных, электрофизических и оптических свойств перспективных материалов и структур нанофотоники и наноплазмоники	65
Развитие инфраструктурной базы научных исследований на основе реализации проекта «Строительство и техническое перевооружение НИОКР-центра ФТИ Им. А.Ф. Иоффе»	69

Научное и функциональное приборостроение	72
Оборудование и технология ГФЭ МОС гетероструктур на основе III-N соединений для СВЧ применений	73
Масс–спектрометрические приборы и методы исследований	76
Оптические квантовые магнитометры	82
Линейка высокочастотных спектрометров ЭПР, электронного спинового эха и двойных резонансов нового поколения, зондово-оптический спектрометр магнитного резонанса	86
Комплекс методик и средств для исследований каскадных солнечных элементов и модулей с концентраторами излучения	91
Новый исследовательский прибор Нанолюминограф	96
Сенсоры и первичные преобразователи на основе редкоземельных полупроводниковых материалов	99
Интегрально-оптические модуляторы на подложках ниобата лития	101
Кремниевые детекторы для Большого Адронного Коллайдера	106
Интегральная оптика для высокоточных оптических измерений	110
Портативный оптический анализатор содержания воды в нефти на основе оптопары «светодиодная матрица – широкополосный фотодиод» среднего ИК диапазона (1.6 – 2.4 µm)	113
Оптоэлектронный сенсор водорода на основе гетероструктур и диодов Шоттки полупроводников А³В⁵	117
Исследования, разработки, результаты	.122
Физика космоса	122
Экспериментальная астрофизика в ФТИ им. А.Ф. Иоффе	122
Космология. Межзвездная и межгалактическая среда ранней Вселенной. Абсорбционные спектры квазаров.	127
Нейтронные звезды и природа сверхплотного вещества	130
Исследования активных образований на Солнце в рентгеновском диапазоне	134
ALEGRO — перспективный высокогорный черенковский телескоп нового поколения для исследования быстропеременных космических гамма-источников	142
Физика УТС, плазмы и электромагнитного ускорения	145
Работы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе по тематике Международного термоядерного реактора ИТЭР	145
Аномальное поглощение и рассеяние при электронном циклотронном нагреве плазмы	149

Исследование турбулентного транспорта в токамаке ФТ-2 с помощью уникальных микроволновых диагностик плазменной турбулентности и глобального гирокинетического моделирования	
Динамика LH-перехода при наличии ГАМ и пеллет-инжекции	
Спектр ионного циклотронного излучения плазмы токамака ТУМАН-3М при инжекционном нагреве	e 161
Вакуумная дуга в коммутационных аппаратах	
Теория конденсированных сред	171
Атомистические расчёты полупроводниковых наноструктур	171
Теория дефектов в кристаллах	173
Численное моделирование фазовых переходов в молекулярных слоях на поверхности твердых тел	175
Резонансное косвенное обменное взаимодействие в наногетероструктурах	
Топологические изоляторы	
Вейлевские полуметаллы	
Гидродинамика электронной жидкости в низкоразмерных системах	
Эффекты храповика в структурах с латеральной сверхрешеткой	
Топологический эффект Холла	
Квантовый эффект Холла в структурах с квантовыми точками и графене	
Транспортные свойства аккумуляционного слоя в SrTiO ₃	
Пространственно-временная динамика сверхбыстрого лавинного переключения полупроводников структур с pn переходами и объемных полупроводников	ых 195
Теория экситонов и трионов в низкоразмерных полупроводниковых системах	
Плазмон-экситонные возбуждения в наноструктурах	201
Оже-рекомбинация, ударная ионизация и перенос энергии в полупроводниковых наноструктурах: квантовых ямах и квантовых точках	202
Оптические силы в нанофотонике и плазмонике	204
Оптика и оптомеханика резонансных структур с квантовыми ямами	
Теория оптических свойств нанокристаллов кремния	
Теория полупроводниковых лазеров с квантово-размерной активной областью	210

Электродинамика слоистых полупроводниковых структур для квантовых каскадных лазеров	212
Теория магнитоэлектрических эффектов деформационного и интерфейсного происхождения в мультиферроидных и ферромагнитных гетероструктурах	213
Магнетосопротивление в органических полупроводниках как проявление корреляционных явлений в прыжковой проводимости	216
Сверхбыстрое переключение намагниченности в ферримагнитных металлах при воздействии коротких оптических и электрических импульсов	217
Теория электронных и ядерных спиновых флуктуаций в наносистемах	219
Материаловедение и наноматериалы	222
Фазовые переходы и тонкие пленки на поверхности конденсированных сред	222
Выращивание объемных кристаллов карбида кремния и нитрида алюминия для использования в оптоэлектронной технике	227
Профилированные кристаллы: управление формой, структурой и свойствами	230
Структура и динамика функциональных материалов на основе антисегнетоэлектриков	235
Электродные материалы для электрохимической энергетики	240
Композитные «полимер-неорганические наночастицы» материалы для оптоэлектроники	243
Создание волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена с физико-механическими характеристиками, сопоставимыми с теоретическими оценками	247
Высокотермостойкие нанокомпозиты на основе гетероциклических полимерных сеток	252
Исследование приповерхностных нанослоев полимеров методом термолюминесценции	256
Поведение перспективных материалов при высокоскоростном взаимодействии	259
Наноуглеродные материалы	263
Физико-химические основы технологии новых функциональных материалов на основе углеродных наноструктур	263
Графен на карбиде кремния: получение, свойства, перспективы промышленного применения	267
Метаматериалы и фотонные кристаллы	274
Опалы – трехмерные фотонные кристаллы для видимого диапазона	275
Управляемые трехмерные композитные фотонные кристаллы	278
Кремниевые фотонно-кристаллические структуры и жидкокристаллические композиты на их основе	281

Металл-полупроводниковые плазмонные нанокомпозиты	
Электромагнитные резонансы в фотонных кристаллах и метаматериалах	
Генерация второй гармоники	
Оптическая спектроскопия экситонов, магнитооптика и спинтроника	
Нелинейная спектроскопия экситонов в полупроводниках методом генерации оптических гармоник	
Линейная и нелинейная оптическая спектроскопия магнитных диэлектриков, мультиферроиков и магнитоэлектриков	
Магнитооптические явления в магнитных полупроводниках – халькогенидах европия	
Магнетизм и спиновые взаимодействия в твердотельных полупроводниковых наносистемах. Спинтроника	
Оптическое управление магнитным порядком наноструктур на пико- и фемтосекундных временах	
Полупроводниковая оптоэлектроника, ТГц и СВЧ	316
Ультрафиолетовая фотоника на основе полупроводников (Al,Ga)N	
Интегральные лазерные конвертеры А²В⁶/А³N зеленого и желтого спектрального диапазона (520-590 нм)	
Инфракрасная оптоэлектроника на основе полупроводников А³В⁵	
Мощные полупроводниковые лазеры, излучающие в диапазоне 650-1800 нм, и приборы на их основе	
Генерация пикосекундных импульсов и динамические характеристики полупроводниковых лазеров с наноразмерной активной областью	
Бесселевы пучки и «оптические пинцеты»	
Квантово-каскадные лазеры	
Мощные монолитно-интегрированные светодиоды с повышенными светотехническими характеристиками видимого и ИК-диапазона	
Однофотонные источники для квантовой криптографии в атмосферных и волоконных оптических линиях связи	
Цезиевый импульсно-периодический разряд (ИПР) в безртутных энергоэффективных осветительных лампах	
Терагерцовая оптоэлектроника на основе естественных сверхрешеток карбида кремния	

Фотовольтаика	354
Фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения	
Каскадные фотоэлектрические преобразователи для космических солнечных батарей	
Концентраторная солнечная фотоэнергетика на основе каскадных гетероструктур	
Кремниевая тонкопленочная фотовольтаика в ФТИ им. А.Ф. Иоффе: от фундаментальных исследований до промышленной технологии	
Кремниевые фотодетекторы со сверхшироким спектральным диапазоном от 0.02-1100 нм	
Высокоточный позиционно-чувствительный датчик с подвижной апертурой (Мультискан)	
Технологии преобразования и накопления электроэнергии	376
Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника	
Термоэлектрические генераторы и холодильники	
Термоэмиссионное преобразование энергии	
Литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы	
Физика живых систем	
Радиоспектроскопия биологических систем	
Исследование изотопных, оптических, электрических и гидратационных процессов в живых организмах	
Исследования важных для биологии и медицины молекул лазерными методами	
Многофукциональные наночастицы на основе мезопористого кремнезема для систем тераностики онкологических заболеваний	403
Медицинский мониторинг и прогнозирование критических угроз жизнеспособности организма в усл экстремальных ситуаций	овиях 406
Заключение	410