

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Молодежная конференция
по физике полупроводников
«Зимняя школа 2026»

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)
25 февраля – 1 марта 2026 года

Зимним школам ФТИ – 30 лет!

Санкт-Петербург
2026

ББК 22.379

У25

Тезисы докладов Молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2026», С.–Петербург (г. Зеленогорск), **25 февраля – 1 марта 2026 г.** – СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2026. – 87 с.

Сборник содержит тезисы докладов-лекций ведущих специалистов и тезисы докладов молодых ученых-физиков по материалам собственных оригинальных работ, представленных на Молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2026» (**25 февраля – 1 марта 2026 г.**). ФТИ им. А.Ф. Иоффе ежегодно проводит Зимнюю школу по физике полупроводников для аспирантов, молодых ученых и студентов старших курсов. Традиционно включена лекция, посвященная Нобелевской премии по физике.

Сборник рассчитан на широкий круг молодых исследователей, преподавателей соответствующих специальностей вузов, научных работников и инженеров, специализирующихся в области физики полупроводников.

Сборник сформирован на основе MS Word файлов, представленных авторами докладов, в процессе верстки исправлены только ошибки стилевого оформления.

Редакторы *П.А. Деметьев, Е.В. Куницына*

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук, 2026

Программный комитет

А.В. Родина (*председатель*)

А.Т. Бурков

А.Г. Забродский

Г.Г. Зегря

С.В. Иванов

Е.Л. Ивченко

П.С. Копьев

Е.В. Куницына

А.Ю. Маслов

О.М. Сресели

С.А. Тарасенко

Оргкомитет

А.Г. Забродский (*председатель*)

Л.Ф. Гребеновская

П.А. Дементьев

Е.В. Дементьева

Л.В. Котова

Е.В. Куницына

Е.А. Лаврова

А.А. Пивоварова

Финансовая поддержка

АО Производственный Комплекс «ФИД - Техника»

ООО «ЭЛЬФОЛЮМ»

ООО «ИоффеЛЕД»

ООО «ИНОПТ»

Техническая поддержка

ООО «АНДЕРС»

Среда, 25 февраля	10
<i>В.П. Федин</i>	14.30–15.15
Металл-органические каркасы: Нобелевская премия по химии 2025 года	10
<i>О.В. Астафьев</i>	15.20–16.05
Сверхпроводниковые квантовые системы: Нобелевская премия по физике 2025 года.....	11
<i>В.П. Драчев</i>	16.30–17.15
Кремниевая интегральная фотоника	11
<i>Д.И. Казаков</i>	17.20–18.05
Неразгаданные загадки в физике элементарных частиц	13
<i>Е.З. Гусаков</i>	18.10–18.55
Развитие исследований и разработок в области управляемого термоядерного синтеза в мире, России и ФТИ	13
Четверг, 26 февраля	14
<i>В.В. Тучин</i>	09.30–11.00
Биофотоника: проблемы и инновационные подходы к их решению в области биомедицинской визуализации и фототерапии	14
<i>С.Г. Тиходеев</i>	15.00–15.45
Оптические и излучательные свойства хиральных полупроводниковых фотонных структур.....	15
<i>Ю.Г. Кусраев</i>	15.50–16.35
Перенос энергии и спина в разбавленных магнитных полупроводниках	16
<i>В.М. Ефанов</i>	17.10–17.55
Мощная нано-пикосекундная импульсная техника. Достижения и перспективы	17
<i>Н.А. Поклонский</i>	18.00–18.45
Что такое « ϵ_2 -электропроводность легированных полупроводников»?	18
Пятница, 27 февраля	24
<i>С.А. Тарасенко</i>	09.30–10.15
Фотоотклик двумерных полупроводников на структурированное излучение.....	18
<i>К.В. Рейх</i>	10.20–11.05
От квантовой точки к фотодетектору	25
<i>В.В. Лундин</i>	14.30–15.15
МОС-гидридная эпитаксия: процесс и оборудование. Опыт создания своего будущего, или как не попасть под чужую оптимизацию.....	26

<i>П.Н. Брунков</i>	15.20–16.05
Химическая модификация электрофизических свойств графена и создание на его основе газовых сенсоров.....	27
<i>И.В. Горбенко</i>	16.30–17.15
Латеральные плазменные кристаллы.....	28
<i>С.В. Сорокин</i>	17.20–18.05
Система квантовая точка-резонатор для однофотонных источников, созданная молекулярно-лучевой эпитаксией.....	29
<i>В.Л. Корнев</i>	18.10–18.55
Синхронизация автоколебаний электронно-ядерной спин-системы	30
Суббота, 28 февраля	31
<i>С.В. Иванов</i>	09.30–10.15
Малая сетевая углеродно-нейтральная энергетика для удаленных территорий РФ на основе микро-АСММ и эффективных электрогенераторов с внешним подводом тепла нового поколения.....	31
Устная конкурсная сессия с докладами молодых ученых	32
<i>А.А. Антипенко</i>	
Особенности спектральных, поляризационных и кинетических свойств фотолюминесценции спиновых стёкол CdMnTe.....	32
<i>Е.А. Башегурова</i>	
Изучение экситонных комплексов в NFDE квантовых точках GaAs/AlGaAs методами оптической спектроскопии.....	33
<i>А.Т. Береснева</i>	
Лазерно-индуцированное переключение поля обменного смещения в структурах антиферромагнетик/ферромагнетик.....	34
<i>Г.П. Вейшторг</i>	
Избирательность оптического возбуждения квантовых точек InAs/InGaAs.....	35
<i>В.С. Вязанкин</i>	
Особенности дальнего поля мощных лазерных диодов с сегментированным контактом	36
<i>А.А. Горшков</i>	
Экспериментальное наблюдение динамики намагниченности в слоистой MAX-фазе $(Cr_{0.5}Mn_{0.5})_2GaC$	37
<i>Г.М. Гуткин</i>	
Сингулярные поверхностные поляритоны на границе одинаковых одноосных кристаллов	38

<i>С.В. Дерибина</i>	
Катодолуминесценция ненапряжённых квантовых точек GaAs/AlGaAs: спектральные и динамические особенности	39
<i>С.С. Замолоцких</i>	
Потенциал самодействия вблизи границы полупроводник/диэлектрик.....	40
<i>А.Л. Зибинский</i>	
Эффекты квантового обратного действия в ансамбле спинов прыгающих электронов.....	41
<i>Д.К. Карузин</i>	
Плазмоны и их затухание в грязных сверхпроводящих пленках	42
<i>Е.Е. Колотаева</i>	
Роль межчастичных столкновений в транспортных свойствах двухкомпонентных двумерных электронных систем с параболическим спектром	43
<i>Е.Д. Кырова</i>	
Эпитаксиальный рост плёнок магнитного топологического изолятора (MnTe) _m (Bi ₂ Te ₃) _n	44
<i>И.О. Райков</i>	
Микроскопические упругие свойства аморфных нанокомпозитов	45
<i>К.И. Русских</i>	
Экситонный энергетический спектр и оптические переходы в сферических нанокристаллах InP/ZnSe	46
<i>А.Ю. Самсонова</i>	
Резонансные дифракционные решетки на основе галогенидных перовскитов	47
<i>Н.Ю. Соловова</i>	
Электронная структура поверхности Na ₂ KSb(111) до и после активации слоями (Cs, Sb).....	48
<i>Г.С. Чекмарев</i>	
Гребёнки резонансов Фано и сингулярности параметра Фано в рассеянии света диэлектрическими частицами.....	49
Стендовая конкурсная сессия с докладами молодых ученых	50
<i>Qinghao Song</i>	
Optical properties of mixed halide perovskites for modern solar cells.....	50
<i>В.В. Гришунов</i>	
Механизм экзотермической реакции пористого кремния в контакте с окислителем.....	51

<i>В.И. Гусев</i>	
Сопrotивление p-n-перехода на основе квантовых точек	52
<i>Е.В. Доморацкий</i>	
Связанные состояния в континууме в полупроводниковой гетероструктуре InAs/In _x Ga _{1-x} As	53
<i>Т.Э. Зедоми</i>	
Фото- и термоиндуцированные сдвиги в оптических свойствах нанокмполитов с частицами As ₂ S ₃ и Au	54
<i>А.А. Зотов</i>	
Эффект аномальной температурной зависимости дислокационной люминесценции в ионно-имплантированном кремнии.....	55
<i>В.А. Калининко</i>	
Исследование модуля Юнга и изменения ширины запрещённой зоны в перовскитах CsPbX ₃ под воздействием давления	56
<i>А.А. Караваева</i>	
Смесовые диэлектрические пленки MgF ₂ +ZnS для светоизлучающих диодов	57
<i>Б.Ю. Ключев</i>	
Исследование механических напряжений в гетероструктурах GaN/AlGaN на подложках SiC во время эпитаксии.....	58
<i>И.В. Коклюшкина</i>	
Синтез и исследование люминесценции ортофосфатов иттрия и лютетия, активированных Eu ³⁺	59
<i>А.Р. Колесникова</i>	
Метаповерхности Гюйгенса на основе материала с фазовой памятью	60
<i>П.Д. Корниенко</i>	
Применимость DDD-метода для оценки радиационной стойкости метаморфных фотоэлектрических преобразователей излучения.....	61
<i>М.И. Кузьменко</i>	
Обменное взаимодействие дырок с ионами марганца в двойной полумагнитной квантовой яме	62
<i>О.Е. Лакунцова</i>	
Гетероструктуры с КТ InAs/InGaAs и сверхтонкими метаморфными буферными слоями In _x Ga _{1-x} As/GaAs(001).	63
<i>Д.М. Ласкин</i>	
Смена знака циркулярной поляризации люминесценции в режиме оптической ориентации дырочных трионов и магнитополяронный эффект в квантовых ямах CdMnTe.....	64

<i>М.В. Левичев</i>	
Оптимизация сильной связи в гибридной поляритонной системе Ag/WS ₂ /ННК GaP	65
<i>А.Д. Малевская</i>	
Верификация трубковой модели растекания тока и анализ карт электролюминесценции фотопреобразователей при помощи анализа трёхмерной распределённой эквивалентной схемы	66
<i>В.Н. Малец</i>	
Сравнение характеристик полупроводниковых лазеров со ступенчатым р-волноводом	67
<i>М.А. Миролубов</i>	
Резонансный туннельный эффект в акустическом волноводе	68
<i>Н.А. Мионов</i>	
Электромагнитный отклик мультрезонансных метаматериалов на основе диоксида ванадия	69
<i>В.А. Поздеев</i>	
Исследование качества пассивации кремния в структурах Al ₂ O ₃ /Si/Al ₂ O ₃ , полученных методом PE-ALD	70
<i>А.Д. Родиончикова</i>	
Исследование ван-дер-ваальсовых гетероструктур на основе графена, MoTe ₂ и WSe ₂ методами сканирующей зондовой микроскопии	71
<i>А.К. Романчук</i>	
Омические контакты к субэлементам многопереходного GaInP/GaInAs/Ge фотопреобразователя	72
<i>П.А. Сырников</i>	
Исследование катодолуминесцентных свойств кристаллов YAG:Nd, полученных методом флюса с использованием хлорида натрия	73
<i>Ю.А. Тиманкова</i>	
Исследование направленного рассеяния на димере из лабиринтных акустических метаатомов.....	74
<i>С.Н. Хруль</i>	
Электрические свойства гетероструктур GaPN(As)/Si.....	75
<i>М.Р. Шарнас</i>	
Влияние собственных и примесных дефектов на электронные и фононные свойства GeTe.	76
<i>И. Шмидт</i>	
Электрические свойства транзисторов на основе оксида индия олова (ITO), полученных методом импульсного лазерного осаждения (PLD).....	77

И.И. Янибеков

Моделирование образования дефектов, их реакций, и расчет уровня Ферми в гексагональном нитриде бора	78
---	----

Внеконкурсная стендовая сессия **79**

С.А. Вотяков

Внешне-локализованные электронные состояния в отрицательно заряженных одностенных углеродных нанотрубках	79
--	----

С.А. Вотяков

Поиск новых фаз при деформации полупроводников <i>in situ</i> с использованием прозрачного алмазного индентора-объектива	80
--	----

С.И. Вотякова

Моделирование процесса индентирования медной пленки на кремниевой подложке с вариациями толщины пленки и радиуса сферического индентора	81
---	----

Н.А. Гиппиус, И.М. Фрадкин, Н.С. Салахова, С.А. Дьяков

Метод резонансного подпространства для составных фотонно-кристаллических систем	82
---	----

Ф. Кераматирадмуса

Шум-ориентированный анализ характеристик биосенсоров на основе FET с гетероструктурой графен/MoS ₂	83
---	----

В.Г. Пахомова, А.О. Шохрина, А.М. Воротинов, Д.А. Великанов, М.Н. Волочаев, С.В. Столяр

Нагрев порошков SiO ₂ в СВЧ поле на частоте 8,9 ГГц	85
--	----

Шимин Чжэн, Е.С. Храмцов, И.В. Игнатьев

Моделирование экситон-экситонного обменного взаимодействия в широкой GaAs/AlGaAs квантовой яме в электрическом поле.....	86
--	----

Металл-органические каркасы: Нобелевская премия по химии 2025 года

В.П. Федин

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

В докладе рассказывается о Нобелевской премии по химии 2025 года. Самую престижную награду в науке поделили Сусуму Китагава, Ричард Робсон и Омар Яги за достижения в области металл-органических каркасов.

Металл-органические каркасы (metal-organic framework, MOF) — это класс координационных соединений, в кристаллической структуре которых атомы металлов или кластеров металлов соединяются через органические лиганды в каркасные структуры, демонстрирующие перманентную пористость (рис. 1). В отличие от других пористых структур, таких как цеолиты, наноуглеродные материалы, силикагели и другие, MOF имеют не только рекордно высокие значения удельной поверхности, но и могут иметь подвижный, «дышащий» скелет, способный изменять свою структуру в ответ на какие-либо внешние химические или физические воздействия, что в перспективе открывает возможность создания разнообразных «умных» мультифункциональных материалов [1].

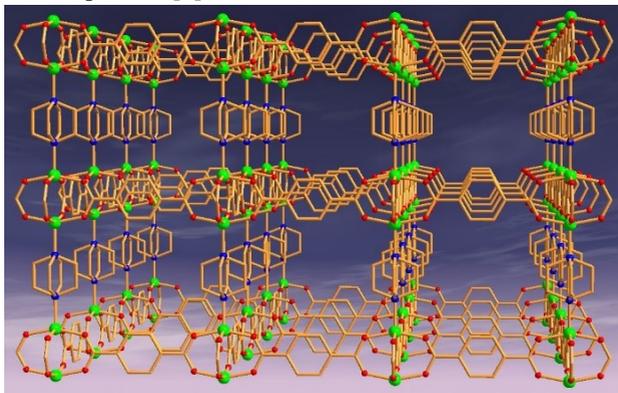


Рис. 1. Пример MOF, построенного из катионов цинка (шарики зеленого цвета) и органических лигандов (оранжевый цвет)

В докладе будут рассмотрены примеры использования MOF для хранения газов, разделения сложных смесей, в том числе углеводородов, для разработки катализаторов, нанореакторов, сенсоров и других функциональных материалов.

Литература

[1] H.-C. Zhou, J.R. Long, O.M. Yaghi. *Chem.Rev.* **112**, 673 (2012).

Сверхпроводниковые квантовые системы: Нобелевская премия по физике 2025 года

О.В. Астафьев

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

МФТИ, Москва, Россия

Современные нанотехнологии позволяют разрабатывать и изготавливать искусственные квантовые системы на основе сверхпроводников, ключевым элементом которых являются джозефсоновские переходы субмикронных размеров. Такие системы имеют набор уровней энергии, отличных от гармонического осциллятора, и поэтому их часто называют искусственными атомами. Они находят применение как в фундаментальной физике, так и для построения устройств нового типа, в частности, квантовых процессоров. Нобелевская премия по физике в 2025 году была присуждена за прямую экспериментальную демонстрацию такого квантования, осуществленную ещё в 80-х годах прошлого столетия. Существенный вклад в эту область также внесли советские физики. Другим эффектом, отмеченным Нобелевским комитетом, было макроскопическое квантовое туннелирование в такой системе. Этот эффект также известен, как квантовое проскальзывание фаз и представляет значительный интерес для квантовой метрологии. В рамках лекции будет дано введение в сверхпроводниковые квантовые системы и показан научный вклад нобелевских лауреатов в эту область.

Кремниевая интегральная фотоника

В.П. Драчев

АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологий» Центр Инженер-

ной Физики Москва, Россия

Исследования в области кремниевой фотоники фокусируются и поддерживаются благодаря заинтересованности в применениях, таких как телекоммуникации и высокоскоростная передача данных, радиофотоника, а также сенсоры, включающие фотодетекторы, лидары, гироскопы, биосенсоры, спектрометры. Современный уровень кремниевых технологий для изготовления фотонных интегральных схем (ФИС) базируется на отработанных технологических процессах кремниевой микроэлектроники. Кремниевая интегральная фотоника успешно конкурирует с альтернативными платформами на основе фосфида индия, нитрида и оксида кремния и других материалов, хотя и не заменяет их полностью. Есть осознание ряда проблем, связанных с интеграцией компонентов, разных материалов на одной платформе, и фотонных и электронных компо-

ментов на одной, желательнo кремниевой, основе, рис.1. Например, фотонная микросхема оптического АЦП может включать в себя кремниевый оптический модулятор, блоки фильтров, матрицы детекторов, низкоскоростные электронные АЦП и схему обратной связи, необходимую для стабилизации блока оптических фильтров.



Рис. 1. Фотонные технологии на платформе кремний на изоляторе (КНИ).

В докладе будут рассмотрены современные подходы, используемые в технологиях кремниевой интегральной фотоники, и описаны разработанные на их основе компоненты фотонных интегральных схем и устройств, а также проведено сравнение с альтернативными технологическими платформами. Набор технологий, как правило, включает разработку и расчет дизайна, изготовление с использованием электронной литографии, плазменного травления, вакуумного нанесения материалов, тестирование экспериментальных макетов, желательнo в рамках одной лаборатории. Обсудим разработанные компоненты фотонных интегральных схем и интегральных устройств [1], таких как планарный широкополосный (40 ГГц) электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе; компактные анализаторы сигналов волоконно-оптических датчиков; кремниевые дифракционные решетки ввода/вывода с рекордными параметрами для прямой решетки, позволяющей изготовление за однократное травление; упорядоченные волноводные решетки; микрокольцевые резонаторы с термооптической перестройкой по длине волны.

Так называемое быстрое прототипирование в небольших лабораториях или центрах на основе электронно-лучевой литографии считается предпочтительней пилотного запуска производственных технологических линий фотолитографии.

Такое подразделение в Центре Инженерной Физики Сколтеха создано для разработки фотонных интегральных устройств на основе электронно-лучевой литографии с последующей передачей технологии на фабрики, использующие технологическую линию фотолитографии с использованием излучения глубокого (вакуумного) ультрафиолета (ВУФ). Набор технологий включает разработку и расчет дизайна, изготовление с использованием электронной литографии, плазменного травления, вакуумного

нанесения материалов, тестирование экспериментальных макетов в рамках одной лаборатории. Краткое обсуждение проектов лаборатории будет представлено в докладе.

Литература

- [1] С.С. Косолобов, И.А. Пшеничнюк, К.Р. Тазиев, А.К. Земцова, Д.С. Земцов, А.С. Смирнов, Д.М. Жигунов, В.П. Драчев. УФН **194**, 1223 (2024).

Неразгаданные загадки в физике элементарных частиц

Д.И. Казаков

ОИЯИ, Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, Дубна, Россия

Рассказ о том, как во второй половине 20 века в физике элементарных частиц произошла смена парадигмы и родилась Стандартная модель фундаментальных взаимодействий, которая является на сегодняшний день основой наших знаний о физике микромира. Кварки, лептоны, глюоны, нейтрино, промежуточные векторные бозоны, нейтральные токи, очарование и прелесть, конфайнмент и экзотические адроны, осцилляции нейтрино и распад протона, хиггсовский бозон и тёмная материя. И гравитация, а как же без неё. И, конечно, неразгаданные загадки и белые пятна Стандартной модели и возможности выхода за её рамки.

Обо всём об этом почти без формул, но серьёзно.

Развитие исследований и разработок в области управляемого термоядерного синтеза в мире, России и ФТИ

Е.З. Гусаков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт Петербург, Россия

В докладе рассказывается как об истории исследований и разработок по управляемому термоядерному синтезу (УТС), начиная с начального, романтического периода, когда его осуществление казалось задачей нескольких лет [1], так и о современном состоянии работ в этой области. Речь пойдёт как об экспериментах с магнитным удержанием плазмы в токамаках и стеллараторах, так и об УТС с инерциальным удержанием. Будут представлены результаты последних экспериментов с дейтериево-тритиевой плазмой на токамаке JET (Joint European Torus) в Калэмской лаборатории, в Великобритании, и на установке NIF (National Ignition Facility) в Ливерморской лаборатории, в США. Обсуждается также современный статус работ по сооруже-

жению экспериментального токамака-реактора ИТЭР, состояние и планы исследований по УТС в РФ и, в частности, в ФТИ им А.Ф. Иоффе.

Литература

- [1] C.M. Braams and P.E. Stott. Nuclear Fusion. Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research. IOP Publishing Ltd. (2002).

Биофотоника: проблемы и инновационные подходы к их решению в области биомедицинской визуализации и фототерапии

В.В. Тучин

Институт физики и научный медицинский центр, СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ СНЦ РАН

Лаборатория биофотоники, НИ ТГУ

Биофотоника основана на исследованиях взаимодействия электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн с биомолекулами, клетками, тканями, организмами и биоматериалами и использовании эффектов взаимодействия в биологии, медицине и биотехнологиях в виде устройств и технологий. Одной из критических проблем является сильное рассеяние практически всех биологических объектов, поэтому актуальны вопросы снижения его влияния физическими, аппаратными и программными средствами.

Перспективным является метод оптического просветления тканей (ОПТ), основанный на временном и обратимом подавлении рассеяния света в тканях и органах с помощью биосовместимых иммерсионных оптических просветляющих агентов (ОПА) [1–4]. Доставка соответствующего ОПА в живую ткань обеспечивает ее временную прозрачность в широком спектральном диапазоне от глубокого УФ до ТГц, что дает более высокий контраст оптических изображений и глубину, с которой их получают, а также повышенную эффективность фототерапии и лазерной хирургии.

В лекциях обобщены основные принципы и последние достижения в области развития метода ОПТ для решения задач прижизненной оптической визуализации, диагностики и терапии. Метод ОПТ значительно улучшает современные технологии мультимодальной спектроскопии/визуализации и фототерапии. Благодаря использованию коммерческих согласующих или контрастных агентов оказывается возможным сочетание оптических методов с УЗИ, КТ и МРТ. Метод ОПТ предлагает дополнительные маркеры для мониторинга осложнений при сахарном диабете и выявления рака на основе измерения скорости молекулярной диффузии ОПА.

Литература

- [1] L. Oliveira and V.V. Tuchin, *The Optical Clearing Method: A New Tool for Clinical Practice and Biomedical Engineering*, Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [2] V.V. Tuchin, D. Zhu, E.A. Genina (Eds.), *Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2022.
- [3] D. Zhu, V.V. Tuchin, *BME Front.* **5**, 0058 (2024).
- [4] T. Yu, X. Zhong, D. Li, J. Zhu, V.V. Tuchin, D. Zhu, *Adv. DrugDeliv. Rev.* **215**, 115470 (2024).

Оптические и излучательные свойства хиральных полупроводниковых фотонных структур

С.Г. Тиходеев

МГУ им. М.В. Ломоносова

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Оптические свойства хиральных фотонных структур привлекают в последнее время большой интерес исследователей. Объект называется хиральным, если его группа симметрии не содержит зеркальных преобразований. Говоря по-простому, хиральный объект не переходит сам в себя ни при каком отражении в плоском зеркале. Хорошо и давно известные оптические проявления хиральности молекул или кристаллов – различие коэффициентов поглощения право- и лево циркулярно поляризованного света (циркулярный дихроизм поглощения) и оптическая активность (вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного света при распространении по хиральной среде). У естественных хиральных сред эти эффекты весьма слабы. Например, угол поворота плоскости поляризации естественных оптически-активных материалов (скажем, раствора сахара) 10^{-4} – 10^{-3} градуса на длине распространения излучения порядка одной длины волны света.

В ходе развития физики гетероструктур и нанотехнологий оказалось, что оптические проявления хиральности могут быть многократно (на многие порядки) усилены в хиральных нано- и микроструктурах. Причем используемые при их изготовлении материалы могут быть полностью ахиральными – например, полупроводником кремнием с воздушными порами – рекордная хиральность достигается хиральностью геометрии структурирования. Это позволяет разработать весьма интересные и полезные для приложений устройства.

В докладе будут рассмотрены следующие примеры таких устройств:

(а) компактные фотолюминесцентные излучатели и лазеры циркулярно-поляризованного света на основе ахиральных полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами или точками, не требующие использования толстых четверть-волновых пластин и постоянного магнитного поля [1-3];

- (б) маршрутизаторы излучения спин-поляризованных квантовых точек [4,5];
- (в) поляризационные фильтры с максимальным циркулярным дихроизмом пропускания и отражения [6,7].

Работа этих устройств основана на использовании свойств фотонных резонансов в хиральных системах, которые также будут обсуждены в докладе.

Литература

- [1] S.V. Lobanov, et al. Phys. Rev. B. **92**, 205309 (2015).
- [2] A.A. Demenev, et al. Appl. Phys. Lett. **109**, 171106 (2016).
- [3] A.A. Maksimov, et al. Phys. Rev. Appl. **17**, L021001 (2022).
- [4] S.A. Dyakov, et al. Phys. Rev. Appl. **14**, 024090 (2020).
- [5] I.M. Fradkin, et al. Adv. Opt. Mat. **12**, 2303114 (2024).
- [6] B. Semnani, et al. Light: Sci. & Appl. **9**, 23 (2020).
- [7] K. Voronin, et al. ACS Photonics **9**, 2652 (2022).

Перенос энергии и спина в разбавленных магнитных полупроводниках

Ю.Г. Кусраев

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Приводятся результаты исследования оптически индуцированной и магнитоиндуцированной поляризации люминесценции разбавленных магнитных полупроводников (РМП типа $A^{II}_{1-x}Mn_xB^{VI}$) и низкоразмерных структур на их основе. Изучение поляризации люминесценции предоставляет богатую информацию об электронной и спиновой динамике носителей и экситонов, о процессах взаимодействия электронных и примесных спинов. Сильное обменное взаимодействие электронных и примесных спинов в РМП и низкоразмерных структурах порождает необычные магнитооптические и спиновые явления, о которых пойдет речь в докладе [1]. Одним из таких явлений является формирование магнитного полярона – спин коррелированного состояния носителя заряда с примесными магнитными ионами. Формирование магнитного полярона сопровождается сдвигом линии излучения в длинноволновую сторону – т. н. поляронный сдвиг. Важное свойство магнитных поляронов в РМП – это возможность выстраивания их магнитных моментов не только в магнитном поле, но и при резонансном возбуждении циркулярно поляризованным светом.

Будут представлены следующие темы:

- а) люминесценция и оптическая ориентация магнитных поляронов в РМП. Анизотропия дырочного магнитного полярона в низкоразмерных структурах. Замедление релаксации магнитного момента полярона;

б) исследование процессов переноса энергии и спина в РМП и низкоразмерных структурах с помощью спектроскопии поляризованной люминесценции;

в) отрицательная циркулярная поляризация люминесценции в квантовых ямах CdMnTe/CdMgTe.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00125-П.

Литература

[1] Introduction to the Physics of Diluted Magnetic Semiconductors, edited by J. Kossut and J.A. Gaj (Springer, Berlin, 2010).

Мощная нано-пикосекундная импульсная техника. Достижения и перспективы

В.М. Ефанов

АО «ПК «ФИД-ТЕХНИКА», Санкт-Петербург, Россия

Исторически импульсная электроника появилась в конце девятнадцатого века и по современным критериям ее можно квалифицировать как мощную импульсную технику. Основными и, по сути, единственными ключами в то время были газовые разрядники с рабочими напряжениями киловольтового уровня. Основателями этой техники были выдающиеся ученые Тесла, Маркони, Попов и многие другие. До настоящего времени газовые ключи относятся к наиболее мощным приборам и широко используются в различных установках лазерной, ускорительной и плазменной техники.

Появление полупроводниковых приборов значительно расширило номенклатуру электронных ключей. В импульсных источниках питания стали использовать мощные транзисторы, тиристоры, диоды, оптические ключи. Однако для формирования нано- и пикосекундных импульсов напряжения с пиковой мощностью мегаваттного и гига-ваттного уровня по-прежнему использовались газовые ключи.

Революционным достижением в этой области стала работа сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе – Грехова И.В. и Кардо-Сысоева А.Ф., которые в 1978 году открыли эффект пикосекундного переключения высоковольтного р-п перехода. В 1983 году Грехов И.В. и Кардо-Сысоев А.Ф. с сотрудниками открыли еще один эффект в высоковольтных р-п переходах – нано-пикосекундное восстановление р-п переходов с полевым механизмом переноса плазмы. Две эти работы стали фундаментом дальнейшего развития нано-пикосекундной техники. Необходимо отметить огромный вклад, внесенный в развитие импульсной техники многими советскими и российскими учеными, особенно академиком Месяцем Г.А. и его соратниками и учениками.

В настоящее время импульсные системы и установки достигают пиковых мощностей тераваттного уровня. Постоянно идет увеличение эффективности подобных

генераторов, уменьшение масса-габаритов, повышается их надежность и средняя мощность.

В докладе будут приведены примеры современных импульсных генераторов для мощных газовых лазеров, для ускорительной техники, для плазмотронов. Будут рассмотрены основные направления развития твердотельных нано-пикосекундных ключей, возможные рекордные параметры для ускорителей, лазеров и термоядерных установок.

Что такое « ϵ_2 -электропроводность легированных полупроводников»?

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Задача количественного описания стационарного прыжкового электрического тока по атомам водородоподобных примесей в кристаллических полупроводниках все еще не решена в пределах желаемого (см. обзоры [1, 2]). В лекции кратко представлены некоторые аспекты этой задачи, в частности расчет энергии термической активации ϵ_2 прыжковой электропроводности по донорам (рис. 1).

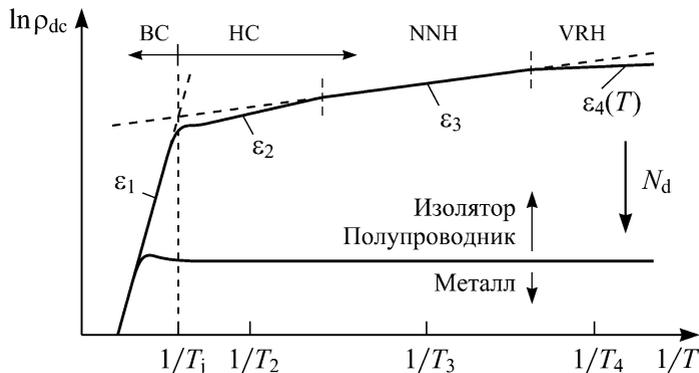


Рис. 1. Схема зависимости логарифма удельного электрического сопротивления $\rho_{dc} = 1/\sigma_{dc}$ на постоянном токе сильно легированного слабо компенсированного полупроводника n -типа от обратной температуры $1/T$ при увеличении концентрации доноров N_d для постоянной степени компенсации доноров акцепторами ($K \approx \text{const}$). При температуре T_j электропроводность по состояниям s -зоны (BC) равна прыжковой по донорам (HC)

Для определенности рассматриваются электроны (e^-) на донорах в трехмерных кристаллических полупроводниках n -типа, хотя в равной мере все последующее из-

ложение относится и к дыркам (h^+) на акцепторах в полупроводниках p -типа. Полагается, что степень компенсации доноров акцепторами со средними по кристаллу концентрациями доноров N_d и акцепторов N_a мала: $K = N_a/N_d \ll 1$.

Удельное электрическое сопротивление ρ_{dc} на постоянном токе в легированных кристаллических полупроводниках в зависимости от обратной температуры (рис. 1) имеет вид (см., например, [3, 4]):

$$\begin{aligned} 1/\rho_{dc} &\equiv \sigma_{dc} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 = \\ &= \sigma_{01} \exp(-\varepsilon_1/k_B T) + \sigma_{02} \exp(-\varepsilon_2/k_B T) + \sigma_{03} \exp(-\varepsilon_3/k_B T) + \sigma_{04} \exp(-\varepsilon_4/k_B T), \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_{dc} — стационарная удельная электропроводность, $\sigma_{01}, \sigma_{02}, \sigma_{03}$ — префакторы, слабо зависящие от абсолютной температуры T по сравнению с соответствующими экспонентами, ε_1 (при $T > T_j$) $> \varepsilon_2$ (в окрестности T_2) $> \varepsilon_3$ (в окрестности T_3) — слабо зависящие от T энергии термической активации электропроводностей $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; k_B — постоянная Больцмана; префактор σ_{04} и энергия ε_4 термической активации прыжков электронов с доноров $|d,0\rangle$ на доноры $|d,+1\rangle$ уменьшаются при понижении температуры в окрестности T_4 . Отметим, что σ_2, σ_3 и σ_4 при $T > T_j$ стремятся к нулю из-за экспоненциального уменьшения концентрации $|d,0\rangle$.

Различают два предельных режима прыжков электронов между донорами: NNN — в основном происходят термически активированные переходы электронов между ближайшими по расстоянию донорами $|d,0\rangle$ и $|d,+1\rangle$ [в зарядовых состояниях (0) и (+1)]; VRH — в основном происходят прыжки электронов, для которых более вероятны переходы между донорами $|d,0\rangle$ и $|d,+1\rangle$ с меньшей разностью уровней энергии, нежели с меньшим расстоянием между ними. Если $\varepsilon_4 \propto T^{3/4}$, то это миграция электронов между донорами по Мотту [5], а если при более низкой температуре $\varepsilon_4 \propto T^{1/2}$, то это миграция электронов по Эфросу–Шкловскому [6], обусловленная образованием в D^{0+} -зоне кулоновской щели на уровне Ферми [7, 8].

Уменьшение ε_1 при увеличении концентрации доноров $N_d = N_{d,0} + N_{d,+1}$ вследствие образования квазинепрерывной полосы одноэлектронных энергий (шириной δE_c) из возбужденных состояний электрически нейтральных доноров $|d,0\rangle$, доступных для миграции «свободных» электронов, согласно [9] имеет вид:

$$\varepsilon_1 = [1 - (a_n/R_{im})]I_d = I_d - \delta E_c, \quad (2)$$

где a_n — боровский радиус орбиты электрона на доноре $|d,0\rangle$ в основном (невозбужденном) состоянии; $R_{im} \approx 0.62[(1 + K)N_d]^{-1/3}$ — радиус (диаметр $d_{im} = 2R_{im}$) сферической области кристаллической матрицы, приходящейся на один атом любой примеси (донор или акцептор); $I_d = e^2/(8\pi\epsilon_r\epsilon_0 a_n)$ — энергия термической ионизации «изолированного» донора $|d,0\rangle$; e — элементарный заряд, ϵ_r — низкочастотная относительная

энергии активации ε_2 -электропроводности легированных полупроводников предложена и доведена «до числа» модель туннельной (скачковой) миграции электронов вблизи порога их подвижности в подзоне нейтральных состояний основных (легирующих) примесей (рис. 2). Отличие ее от модели Хаббарда (см., например, [15]) состоит в методе расчета порога туннельной подвижности $E_{id}^{(f)}$ межпримесных туннельных переходов электронов.

Порог дрейфовой подвижности электронов c -зоны $E_m^{(c)} = -\delta E_c < 0$ соответствует энергии термической ионизации доноров $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, находится вблизи дна c -зоны в полупроводниках n -типа и обусловлен перекрытием возбужденных состояний $|d,0\rangle$. Порог туннельной подвижности $E_{id}^{(f)} < 0$ для ε_2 -электропроводности определяется термически активированными переходами электронов ($|d,0\rangle + |d,0\rangle \rightarrow |d,+1\rangle + |d,-1\rangle$) с последующей безактивационной туннельной миграцией зарядовых состояний (-1) доноров по кристаллу ($|d,-1\rangle + |d,0\rangle \rightarrow |d,0\rangle + |d,-1\rangle$). Пути миграции электронов по донорам частично блокируются ионами примесей. Предполагалось, что доноры и акцепторы образуют единую простую нестехиометрическую кубическую «решетку» в кристаллической матрице с расстоянием d_{im} между примесями (рис. 3).

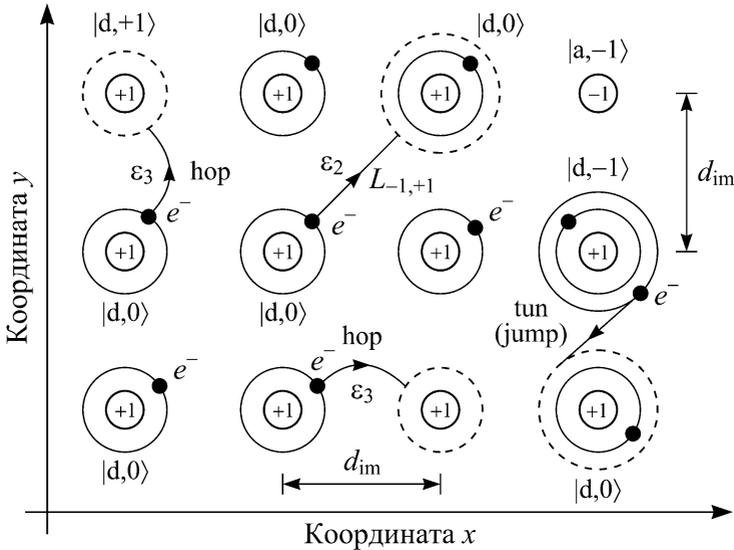


Рис. 3. Двумерная схема (в плоскости xy) примесной простой кубической решетки из доноров $|d,-1\rangle$, $|d,0\rangle$, $|d,+1\rangle$ и акцепторов $|a,-1\rangle$ в кристаллической матрице слабо компенсированного полупроводника n -типа. Показаны переходы электронов (e^-) между донорами в зарядовых состояниях (-1) , (0) и $(+1)$; “hop” — прыжок электрона между $|d,0\rangle$ и $|d,+1\rangle$ с термической энергией активации ε_3 ; “tun” (“jump”) — туннельный безактивационный переход электрона между $|d,-1\rangle$ и $|d,0\rangle$; ε_2 — термическая энергия активации (ассистированного фононами) перехода электрона между $|d,0\rangle$ и $|d,0\rangle$, при котором образуются два иона: $|d,+1\rangle$ и $|d,-1\rangle$

Для атомов примесей, образующих в кристалле решетку с периодом трансляции $d_{\text{им}} \approx 1.24[(1 + K)N_d]^{-1/3}$, определим температуру T_j , при которой $\sigma_1 \approx \sigma_2$. По теореме вириала (см., например, [16]) при концентрации электронов c -зоны $n \ll K(1 - K)N_d$ для $N_{d,-1} \ll N_{d,+1} = KN_d$ получаем [14]:

$$T_j = (1/3k_B)(e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 R_{\text{ch}}) \approx [(0.677/k_B)(e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0)](KN_d)^{1/3}, \quad (3)$$

где $R_{\text{ch}} \approx 0.62(2KN_d)^{-1/3}$ — радиус сферической области, приходящейся на один ион примеси в кристалле; $N_{d,+1} + N_{d,-1} + KN_d \approx 2KN_d$ — концентрация ионов примесей.

Таким образом, в окрестности температуры $T_2 \approx T_j/2$ происходят переходы электронов между состояниями $|d,0\rangle$ и $|d,0\rangle$ из нижней донорной зоны $D^{0/+}$ на край порога туннельной миграции $E_{\text{td}}^{(f)}$ электронов (рис. 1, 2).

Энергию активации ϵ_2 определим по [14] как разность между уровнем Ферми $E_F^{(f)}$ и порогом туннельной подвижности $E_{\text{td}}^{(f)}$:

$$\epsilon_2 = -E_F^{(f)} + E_{\text{td}}^{(f)} \approx -E_F^{(f)} - 1.376(e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0)[(1 + K)N_d]^{1/3} > 0, \quad (4)$$

где уровень Ферми $E_F^{(f)} < 0$; $E_{\text{td}}^{(f)} = -[\delta E_c + E_{\text{cof}}^{(d)}] < 0$; значение $\delta E_c = a_n I_d / R_{\text{им}}$ определяется по формуле (2), $E_{\text{cof}}^{(d)} = e^2 / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0 L_{-1,+1})$; $L_{-1,+1} = \sqrt{2}d_{\text{им}}$.

Значение уровня Ферми $E_F^{(f)} < 0$, отсчитанное от дна c -зоны $E_c = 0$, вычисляется из уравнения электронейтральности кристалла $N_{d,+1} = KN_d = N_a$ для $N_{d,-1} \ll N_{d,+1}$ при $K \ll 1$. При расчете $E_F^{(f)}$ учитывается эффективная ширина $D^{0/+}$ -зоны W_d (для гауссова распределения уровней энергии доноров относительно I_d):

$$W_d = (e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_{\text{им}})[12K/(1 + K)]^{1/2},$$

которая определяется кулоновским взаимодействием выделенного иона донора с ионами в первой координационной сфере трехмерной примесной решетки [14].

При переходе электрона между первыми ближайшими по расстоянию двумя донорами $|d,0\rangle$ в примесной решетке велика вероятность обратного перехода электрона. Поэтому в формуле (4) учтено, что в прыжковой миграции при температуре $T \approx T_2$ участвуют два $|d,0\rangle$, которые являются вторыми ближайшими по расстоянию соседями, расположенными на расстоянии $L_{-1,+1}$ (рис. 3). При температуре T_2 , много меньшей температуры Дебая, средняя энергия акустического фонона по [17] есть $\langle E_q \rangle = (\pi^4/36)k_B T_2$. При термически активированном переходе электрона между двумя $|d,0\rangle$ с образованием ионов $|d,+1\rangle$ и $|d,-1\rangle$, а также при переходе электрона между $|d,-1\rangle$ и $|d,+1\rangle$ с образованием двух $|d,0\rangle$ проявляется ассистирование этих электронных переходов одним, двумя и т. д. фононами, каждый с энергией $\approx \langle E_q \rangle$.

Выполненный по формуле (4) расчет энергии термической активации ϵ_2 на всей

изоляционной стороне концентрационного фазового перехода изолятор–металл (перехода Мотта при $N_d = N_M$) демонстрирует количественное согласие с известными экспериментальными данными для кристаллов n -Si:P и n -Ge:Sb (рис. 4).

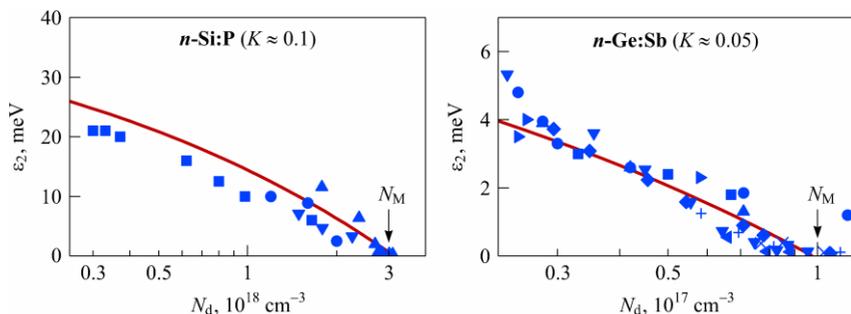


Рис. 4. Энергия активации ε_2 -электропроводности кристаллов n -Si:P и n -Ge:Sb в зависимости от концентрации доноров: линии — расчет по формуле (4), точки — экспериментальные значения из цитированной в [14] литературы

В заключение следует отметить, что применение в опто- и микроэлектронике явления прыжковой миграции электронов (e^-) и дырок (h^+) по точечным и линейным дефектам в кристаллических матрицах только начинается.

Автор искренне благодарит академика А.Г. Забродского — соавтора по этому и другим многочисленным исследованиям прыжковой электрической проводимости легированных полупроводников.

Работа поддержана ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии» Республики Беларусь.

Литература

- [1] M. Pollak. Phys. Status Solidi B, **230(1)**, 295–304 (2002).
- [2] I. Shlimak. Is Hopping a Science? Selected Topics of Hopping Conductivity (Singapore, World Scientific, 2015), XIV+140 p.
- [3] H. Fritzsche. Phys. Rev., **99(2)**, 406–419 (1955).
- [4] И.П. Звягин. Кинетические явления в неупорядоченных полупроводниках (М., МГУ, 1984), 192 с.
- [5] N.F. Mott. Phil. Mag., **19(160)**, 835–852 (1969).
- [6] A.L. Efros, B.I. Shklovskii. J. Phys. C, **8(4)**, L49–L51 (1975).
- [7] B.I. Shklovskii. Low Temp. Phys., **50(12)**, 1101–1112 (2024).
- [8] A.G. Zabrodskii. Phil. Mag. B, **81(9)**, 1131–1151 (2001).
- [9] Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.Н. Деревяго. Журнал БГУ. Физика, **2**, 28–41 (2020).
- [10] А.И. Ансельм. ЖЭТФ, **24(1)**, 83–89 (1953).
- [11] Дж.Р. Тейлор. Теория рассеяния. Квантовая теория нерелятивистских столкновений (М., Мир, 1975), 568 с.
- [12] М.А. Lampert. Phys. Rev. Lett., **1(12)**, 450–453 (1958).
- [13] Б.М. Смирнов. Физика атома и иона (М., Энергоатомиздат, 1986), 216 с.

- [14] N.A. Poklonski, I.I. Anikeev, S.A. Vyrko, A.G. Zabrodskii. Phys. Status Solidi B, **262(1)**, 2400178 (2025).
- [15] Я.С. Ляхова, Г.В. Астрцов, А.Н. Рубцов. УФН, **193(8)**, 825–844 (2023).
- [16] Б.В. Васильев, В.Л. Любошиц. УФН, **164(4)**, 367–374 (1994).
- [17] N.A. Poklonski, A.N. Dzeraviahia, S.A. Vyrko, A.G. Zabrodskii, A.I. Veinger, P.V. Semenikhin. AIP Adv., **11**, 055016 (2021).

Фотоотклик двумерных полупроводников на структурированное излучение

С.А. Тарасенко

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Структурированный свет – термин, который используют для оптических пучков со сложной пространственной структурой электромагнитного поля. Примерами структурированного света являются векторные пучки, состоящие из фотонов с различной поляризацией, и закрученные оптические пучки, несущие орбитальный угловой момент [1,2]. Успехи в создании оптических пучков с контролируемой структурой электромагнитного поля стимулируют экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействия структурированного света с полупроводниковыми и металлическими системами и поиску новых оптических и фотоэлектрических явлений.

В лекции обсуждается отклик двумерных полупроводников, таких как графен, мономолекулярные слои дихалькогенидов переходных металлов, квантовые ямы, на структурированное излучение [3-8]. Основное внимание уделено эффектам генерации текстурированных электрических и спиновых фототоков и токов на удвоенной частоте. В отличие от традиционных фотогальванических эффектов и эффекта генерации второй гармоники в кристаллах без центра инверсии, токи на нулевой и удвоенной частоте возникают здесь из-за пространственной неоднородности самого электромагнитного поля и полностью контролируются структурой поля: распределением интенсивности, поляризации и фазы.

Обсуждается теоретическое описание взаимодействия структурированного света с полупроводниками и механизмы генерации фототоков для различных спектральных диапазонов, соответствующих как внутризонному транспорту [4,7], так и межзонным оптическим переходам [8]. Для оптических переходов между валентной зоной и зоной проводимости спиновые и электрические токи связаны с оптической ориентацией электронных спинов циркулярно поляризованным светом и оптическим выстраиванием электронных импульсов линейно поляризованным светом. Помимо этих эффектов, определяемых локальной поляризацией света, вклад в фототоки вно-

сят также эффекты, обусловленные нелокальностью оптической генерации и чувствительные к пространственному распределению фазы электромагнитного поля. Электрические и спиновые токи также конвертируются друг в друга за счет спинового эффекта Холла и обратного спинового эффекта Холла.

Структурированное излучение раздвигает границы нелинейной оптики и фотоэлектрических явлений за рамки ограничений, налагаемых пространственной симметрией кристаллической решетки.

Литература

- [1] A. Forbes, M. de Oliveira, and M. R. Dennis. *Nat. Photonics* **15**, 253 (2021).
- [2] Б.А. Князев, В.Г. Сербо. *УФН* **188**, 508–539 (2018).
- [3] Z. Ji, W. Liu, S. Krylyuk et al. *Science* **368**, 763 (2020).
- [4] A.A. Gunyaga, M.V. Durnev, and S.A. Tarasenko. *Phys. Rev. B* **108**, 115402 (2023).
- [5] J. Ishihara, T. Mori, T. Suzuki et al. *Phys. Rev. Lett.* **130**, 126701 (2023).
- [6] K. Wang, B. Zhang, Ch. Yan, L. Du, and Sh. Wang. *Nature Commun.* **15**, 9036 (2024).
- [7] A.A. Gunyaga, M.V. Durnev, and S.A. Tarasenko. *Phys. Rev. Lett.* **134**, 156901 (2025).
- [8] A.A. Gunyaga, M.V. Durnev, and S.A. Tarasenko. *arXiv:2512.11677*.

От квантовой точки к фотодетектору

К.В. Рейх

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт Петербург, Россия

Коллоидные квантовые точки (ККТ) перестали быть исключительно научной экзотикой и нашли практическое применение в оптоэлектронных устройствах. Их уникальные оптические свойства, зависящие от размера, уже используются в дисплеях и фотодетекторах. В частности, в 2025 году в России была создана первая фотоприемная матрица на пленках из коллоидных квантовых точек.

Для разработки эффективных приборов необходимо понимать и контролировать электропроводность таких пленок из ККТ — задача непростая из-за квантового confinement, кулоновских эффектов и беспорядка. Если для описания оптических свойств часто достаточно рассмотреть одну ККТ, то для объяснения электронных свойств пленок требуется анализ их совокупности.

В докладе рассматриваются электронные свойства пленок, состоящих из ККТ. Во многом они сходны со свойствами объемных полупроводников, но в ряде случаев существенно отличаются из-за дискретности размеров квантовых точек и специфического беспорядка в пленке: вариации размеров и расстояний между ККТ, а также вариации числа доноров. Будут обсуждены переход металл—диэлектрик в таких пленках, особенности прыжковой проводимости в диэлектрической фазе и диэлектрические свойства пленок из ККТ.

МОС-гидридная эпитаксия: процесс и оборудование.

Опыт создания своего будущего, или как не попасть под чужую оптимизацию

В.В. Лундин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт Петербург, Россия

МОС-гидридная эпитаксия (МОГФЭ, MOVPE, MOCVD) была изобретена в 1968 году (Н. Manasevit). Физико-химические процессы синтеза материала в этой технологии существенно сложнее, зависимость от конструкции реактора заметно сильнее, а переносимость технологии между установками много труднее, чем у единственного реального конкурента – молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ). Однако МОГФЭ давно и устойчиво доминирует в промышленном производстве гетероструктур III-V и III-N. Способствовали этому меньшие требования к культуре изготовления и эксплуатации оборудования, аппаратная и инфраструктурная близость к CVD технологии кремния, а также отказ в выдаче патента на MOCVD (неоднозначное решение патентного ведомства США).

Поначалу технологи делали MOVPE установки сами или заказывали в компаниях, пытавшихся освоить эту нишу. Но в 90-е годы мировой рынок MOVPE оборудования уже контролировался тремя игроками, выдавившими или поглотившими конкурентов. AIXTRON и Emcore (ее машиностроительный отдел в 2003 году продан Veeco) формировали классическую дуополию. В Японии в борьбу вмешивался третий игрок – TNSC. Как это часто бывает, жесточайшая конкуренция не приводила ни к снижению стоимости, ни к повышению качества, ни к заполнению узких рыночных ниш, ни к быстрой реакции на новые вызовы. Для развития MOVPE технологии это было очень болезненно, поскольку она крайне аппаратно-зависимая, многие практические применения остались без аппаратного обеспечения, навык самостоятельного создания оборудования утерян еще в 80-е, а установки с тех пор стали намного сложнее. Последние 10 лет ситуация на рынке MOVPE оборудования стала интереснее, появились новые производители, но из-за разрушения глобальных рынков жизнь потребителей проще не стала.

Проблемы мирового рынка MOVPE установок мы осознали еще в середине 2000-х и стали развивать собственную линию оборудования, принципиально отличного от решений других производителей. Первая наша установка работает с 2013 года (проведено более 6000 эпитаксий), год за годом построено еще 5 (разных!), работа по развитию этого семейства активно продолжается.

Упомянутое выше – физико-химические процессы синтеза гетероструктур, доминирующие на рынке типы установок, их недостатки, наши пути решения проблем – будет подробнее обсуждаться в лекции.

Химическая модификация электрофизических свойств графена и создание на его основе газовых сенсоров

П.Н. Брунков, М.К. Рабчинский, С.А. Рыжков, М.В. Байдакова, С.Д. Савельев, Г.А. Антонов, Н.Н. Ажоткина, В.А. Сениченков, Н.Д. Прасолов
ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Развитие исследований графена привело к появлению целого семейства производных графена — графеновых материалов, модифицированных заданными функциональными группами и типами дефектов. Благодаря широкой вариативности их физических свойств производные графена быстро стали одними из наиболее перспективных наноматериалов для разработки электронных устройств, электрохимических систем накопления энергии и сенсорных систем нового поколения. В то же время остаются нерешёнными вопросы масштабируемого и воспроизводимого синтеза, а также тонкой настройки физических свойств за счёт выбора параметров модификации производных графена.

Нами были разработаны оригинальные технологии получения набора производных графена, таких как карбоксилированный, карбонилированный графен, бромированный, аминированный и тиолированный графен, на основе жидкофазных методов модификации оксида графена.

В докладе будут представлены результаты исследований влияния отдельных функциональных групп и их массивов на электронную структуру и электрофизические свойства химических производных графена [1-6].

В качестве примера перспективного применения полученных производных графена на их основе разработана линейка газоаналитических мультисенсорных чипов, а также создана оригинальная система «Электронный нос», сформированная вокруг этих чипов [7-8].

Литература

- [1] M.K. Rabchinskii et al. *Carbon*, **172**, 236-247 (2021)
- [2] O.E. Glukhova, M.K. Rabchinskii, S.D. Saveliev, D.A. Kirilenko, P.V. Barkov, *J. Compos. Sci.* **6**, 335 (2022)
- [3] M.K. Rabchinskii et al., *Nanomaterials*. **14**, 735 (2024)
- [4] M.K. Rabchinskii et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*. **15**, 28370–28386 (2023)
- [5] M.K. Rabchinskii et al., *Nanomaterials*. **13**, 23 (2023).
- [6] S. Matveenko et al., *Sens. Actuators: A. Phys.* **396**, 117123 (2025).
- [7] Патент на изобретение RU2814613, дата выдачи 2024.03.01
- [8] Патент на изобретение RU2839632, дата выдачи 2025.05.06

Латеральные плазменные кристаллы

И.В. Горбенко

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

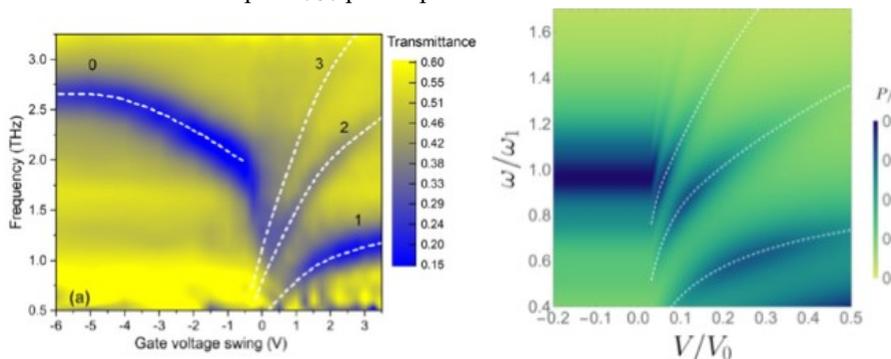
В работе представлена непертурбативная теоретическая модель латерального плазменного кристалла (ЛПК), двумерной структуры с периодической модуляцией концентрации носителей, управляемой решетчатым затвором [1]. Решены три задачи.

1) Описан управляемый переход между режимами слабой и сильной связи плазмонов, что качественно объясняет экспериментальные данные по перестройке резонансов в коэффициенте прохождения ТГц излучения [2] – эксперимент, [3] – теория.

2) Развита теория фотогальванического эффекта («эффект храповика») в ЛПК. В отличие от ранних пертурбативных моделей [4], она учитывает сильную модуляцию потенциала и предсказывает резкое усиление фототока благодаря интерференции «темных» и «светлых» плазменных мод [5].

3) Систематизированы механизмы плазменной неустойчивости [1] и усиления оптического сигнала в ЛПК [6] при пропускании постоянного тока. Описана неустойчивая интерференция собственных решений ЛПК. Также обнаружен режим с большим инкрементом неустойчивости, в котором плазменные волны «раскачиваются» в одной из областей ЛПК по аналогии с неустойчивостью Дьяконова и Шура [7].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-62-00010.



Эксперимент (слева) – зависимость коэффициента прохождения через мультислоистовую структуру от напряжения на затворе [2]. Теория (справа) – переход от режима сильной связи в режим слабой связи. 2D карта диссипации качественно воспроизводит экспериментальный результат.

Литература

- [1] V.Yu. Kachorovskii, M.S. Shur. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 232108 (2012).
- [2] P. Sai et al. *Phys. Rev. X* **13**, 041003 (2023).

- [3] I.V. Gorbenko, V.Yu. Kachorovskii. Phys. Rev. B **110**, 155406 (2024).
- [4] E.L. Ivchenko and S.D. Ganichev JETP Lett. **93**, 673 (2011).
- [5] I.V. Gorbenko, S.O. Potashin, V.Yu. Kachorovskii arXiv:2601.12073 (2026).
- [6] S.A. Mikhailov. Phys. Rev. B **58**, 1517 (1998).
- [7] M. Dyakonov, M. Shur. Phys. Rev. Lett. **71**, 2465 (1993).

Система квантовая точка-резонатор для однофотонных источников, созданная молекулярно-лучевой эпитаксией

С.В. Сорокин

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Использование полупроводниковых квантовых точек (КТ) является одним из наиболее перспективных подходов для создания источников неклассического света – излучателей одиночных фотонов (ИОФ), которые востребованы для применений в системах оптических квантовых вычислений и квантовых коммуникаций. Наилучшие результаты на сегодняшний день как по чистоте однофотонного излучения, так и по яркости (эффективности) однофотонного излучателя продемонстрированы на гетероструктурах (ГС) с КТ InAs/GaAs с длиной волны излучения ~ 920 нм ($T = 4$ К), выращенных на подложках GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1]. В докладе будут рассмотрены механизмы реализации методом МЛЭ ансамбля КТ с центральной длиной волны излучения $\lambda = 920$ нм ($T = 4$ К) и низкой поверхностной плотностью. Будет рассмотрены вопросы выбора уровня n-легирования области, расположенной в резонаторной полости на определенном расстоянии от слоя КТ, с целью контроля зарядового состояния одиночных КТ InAs/GaAs в процессе изготовления микрорезонаторных p-n-p ГС.

В докладе также будет представлен метод реализации эффективных ИОФ, излучающих в телекоммуникационном C-диапазоне ($\lambda \approx 1.55$ мкм) длин волн, связанный с применением эпитаксиальных ГС с КТ InAs/InGaAs и метаморфным буферным слоем (МБС) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) [2]. Будут рассмотрены особенности формирования методом МЛЭ таких ГС, особенности релаксации упругих напряжений и образования дислокаций в МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) с различным профилем изменения состава, а также механизмы возникновения и подавления перекрестно-штриховой («cross-hatch») морфологии поверхности. Будет обсуждаться роль сверхтонкого слоя GaAs, используемого для модификации кинетики формирования КТ InAs/InGaAs с целью подавления образования так называемых квантовых штрихов, вытянутых вдоль выделенного кристаллографического направления [1-10]. Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной Карты

Литература

- [1] X. Ding et al., Nat. Photon. **19**, 387–391 (2025)
[2] S.V. Sorokin et al., JETP Lett. **121**, 35-40 (2025)

Синхронизация автоколебаний электронно-ядерной спин-системы

В.Л. Корнев

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе изучается динамика нелинейно-осциллирующей системы под периодическим внешним воздействием. В качестве физического объекта используется ансамбль электронно-ядерных спинов в полупроводниковой структуре InGaAs, который при постоянном лазерном возбуждении демонстрирует устойчивые самовозбуждающиеся осцилляции. Подобные колебания служат удобной платформой для исследования синхронизации и переходов к сложным режимам движения при внешней периодической накачке [1].

Основной эксперимент заключается в периодическом модулировании поляризации лазерного возбуждения с частотой f_m близкой к собственной частоте автоколебаний системы f_0 . Это достигается с помощью электро-оптического модулятора, который изменяет состояние поляризации с заданной глубиной модуляции ε . Далее измеряется реакция системы с помощью эффекта вращения Фарадея для слабого пробного луча, проходящего через образец, что даёт доступ к динамике спиновой поляризации.

Ключевые экспериментальные данные демонстрируют, как внешнее периодическое воздействие изменяет поведение системы: от режимов захвата частоты до сложных спектральных структур:

Основные временные сигналы и их спектры показывают, как спектральные пики отклоняются от собственных гармоник системы при изменении f_m .

Когда f_m совпадает с f_0 или его рациональными дробями, наблюдается захват частоты колебаний, при котором спектральные линии привязаны к частоте модуляции.

В спектрах видно, что вне диапазонов захвата возникают серии субгармоник, отражающие сложные отклики системы — это проявляется через множество новых частотных компонент, не кратных простой гармонике

Развита модель нелинейных авто-осцилляторов, которая качественно воспроизводит наблюдаемые явления и объясняет их через обычные механизмы нелинейной частотной адаптации.

Полученные результаты подчёркивают важность экспериментального контроля

параметров внешней синхронизации для управления динамикой в подобных системах.

Литература

[1] A. Greulich, N.E. Kopteva, V.L. Korenev, P.A. Haude, M. Bayer, Nat. Comm. **16**, 2936 (2025)

Малая сетевая углеродно-нейтральная энергетика для удаленных территорий РФ на основе микро-АСММ и эффективных электрогенераторов с внешним подводом тепла нового поколения

С.В. Иванов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт Петербург, Россия

Доклад посвящен проблемам и перспективам развития малой сетевой углеродно-нейтральной энергетика для удаленных и изолированных территорий Арктической зоны РФ и Дальнего Востока на основе когенерационных тепловых машин нового поколения, способных работать от любых источников тепла, включая мобильные автономные микро-АСММ (атомные станции малой мощности) от 1 до 5 МВт тепловой мощности.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработал концепцию, физические принципы, дизайн и провел предварительные испытания макетных образцов двух типов инновационных анаэробных электрогенерирующих агрегатов (ЭГА), базирующихся на термодинамическом цикле, близком к циклу Карно, т. е. обладающих высоким КПД, а также высокой плотностью мощности – более 100 Вт/см³. Первый из ЭГА – роторно-лопастной двигатель с внешним подводом тепла, работающий по циклу Стирлинга, но существенно превосходящий стандартные поршневые двигатели Стирлинга по достижимой мощности одиночного агрегата (свыше 100 кВт электрической мощности), массогабаритным характеристикам, ресурсу автономной работы и др. Второй – высокотемпературный термоэмиссионный преобразователь кнудсеновского (бесстолкновительного) типа, способный достигать КПД до 30 % и удельной мощности до 50 Вт/см² при температурах катода/анода 2600/1500К. В докладе будут представлено краткое обсуждение дизайнов и характеристик обоих типов ЭГА и потенциала их использования для различных применений в составе микро-АСММ, а также других тепловых генераторов.

Устная конкурсная сессия с докладами молодых ученых

Особенности спектральных, поляризационных и кинетических свойств фотолюминесценции спиновых стёкол CdMnTe

А.А. Антипенко

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Исследования спиновых стёкол CdMnTe с большим содержанием Mn обладают высокой практической актуальностью. Они открывают путь к созданию элементов, где информация переносится спинами, а не зарядами, что предвещает революционное снижение энергопотребления [1]. Нами были исследованы спектры фотолюминесценции объёмного $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x = 40\%$) при температуре 1.5 К в магнитном поле до 6 Тл в геометрии Фарадея. При межзонном фотовозбуждении в спектре излучения наблюдается полоса внутрицентральной люминесценции Mn (ВЛМ) и полоса фотолюминесценции (ФЛ) локализованных экситонов. При резонансном фотовозбуждении в полосу ВЛМ наблюдается антистоксова экситонная ФЛ, которая может быть вызвана двухступенчатым поглощением света d-электронами Mn. В магнитном поле, при межзонном возбуждении полоса экситонной ФЛ расщепляется на две циркулярно-поляризованные компоненты, при этом степень циркулярной поляризации по спектру достигает 100% на коротковолновом краю этой люминесценции. При этом, спектральное положение обеих компонент сдвигается в длинноволновую область спектра. При резонансном возбуждении полоса экситонной ФЛ не расщепляется, но сдвигается в область низких энергий, поляризуясь до 35% в поле 6 Тл. Нами были измерены также кинетики ФЛ при межзонном и резонансном возбуждении. Были обнаружены две компоненты экситонной ФЛ: короткоживущая, с характерным временем затухания около 1 нс и долгоживущая – со временем порядка 6 нс. Также наблюдается присутствие в кинетике затухания ВЛМ с характерным временем ~ 20 мкс. Долгоживущая компонента может возникать из-за формирования экситонного магнитного полярона или влияния возбужденного электронного состояния Mn. Предполагаемое различие времён спиновой релаксации этих компонент может объяснить различие степени циркулярной поляризации в магнитном поле для разных энергий фотовозбуждения.

Автор благодарит Н.В. Козырева, Б.Р. Намозова и Ю.Г. Кусраева за помощь в постановке и проведении эксперимента, и за обсуждение результатов.

Литература

[1] А.В. Огнев, А.С. Самардак. Вестник Дальневосточного отделения РАН 4, 70 (2006).

Изучение экситонных комплексов в NFDE квантовых точках GaAs/AlGaAs методами оптической спектроскопии

Е.А. Башегурова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Квантовые точки (КТ) GaAs/AlGaAs, создаваемые методом эпитаксиального заполнения нанотверстий, протравленных под каплями Ga (NFDE), получили применение в устройствах информационной фотоники и квантовых вычислений, как источники одиночных и запутанных фотонов [1]. Для того, чтобы приступить к созданию полноценного устройства на основе КТ, необходимо пройти несколько шагов и первый из них – создание гетероструктур и исследование их оптических свойств.

Показано, что в спектре фотолюминесценции КТ наблюдаются резонансы для двух типов КТ – А и В, для каждого из которых выделены пики экситона (X) и биэкситона (XX) (см. рис. 1(a)). Такой вывод был сделан на основе исследования зависимости интенсивности фотолюминесценции КТ от мощности лазера накачки. При проведении анализа спектров фотолюминесценции для порядка 300 КТ было замечено, что зависимость энергии связи XX от энергии X является общей для двух типов КТ, а с увеличением энергии X возрастает энергия связи XX (см. рис. 1(б)).

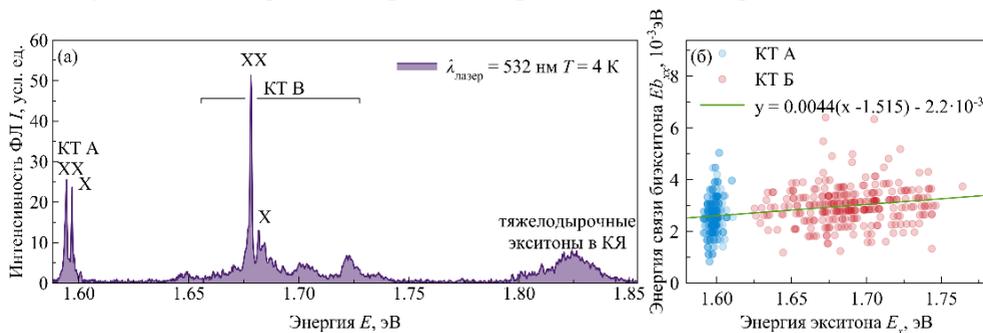


Рис. 1. (а) Спектр фотолюминесценции КТ GaAs/AlGaAs. (б) Зависимость энергии связи XX в КТ А и В от энергии X.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника».

Литература

- [1] N. Somaschi, V. Giesz, L. De Santis, et al. Nat. Photon. **10**, 340–345 (2016)

Лазерно-индуцированное переключение поля обменного смещения в структурах антиферромагнетик/ферромагнетик

А.Т. Береснева

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В области энергоэффективной записи и хранения информации перспективным является использование обменно-связанных слоёв антиферромагнетика и ферромагнетика (АФ/ФМ) [1]. В таких структурах наблюдается лазерно-индуцированное сверхбыстрое переключение намагниченности, связанное с изменением направления поля обменного смещения на противоположное [2].

При увеличении плотности энергии накачки продемонстрирован пороговый переход от возбуждения динамики намагниченности к переключению направления поля обменного смещения $H_{ex.b}$ на противоположное. Величина плотности энергии накачки p_l определяет время $\Delta\tau$, при котором поле обменного смещения отсутствует вследствие нагрева структуры выше температуры закрепления (рис. 1а). Условием переключения является равенство $\Delta\tau$ времени прецессионного изменения направления намагниченности после возбуждения τ_{sw} . При намагничивании против поля обменного смещения возможны два случая (рис. 1б). Если внешнее магнитное поле меньше поля обменного смещения, для переключения прецессионная смена направления намагниченности должна произойти за время $\Delta\tau$. Если внешнее поле больше поля обменного смещения, то переключение происходит при достижении температуры закрепления. В работе на примере структуры CoFeB(10 нм)/IrMn(10 нм) мы экспериментально наблюдали зависимость порога p от величины внешнего магнитного поля H_{ext} .

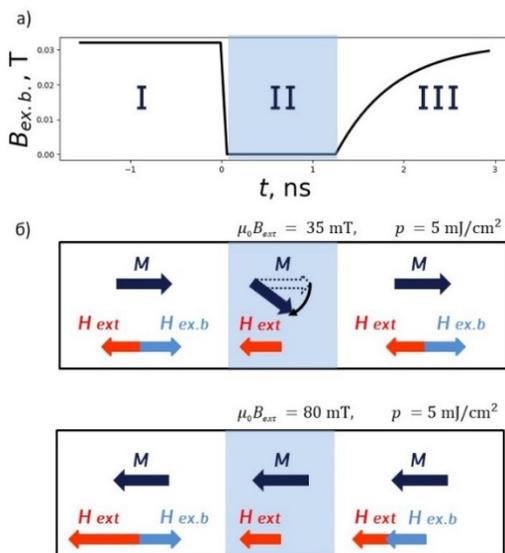


Рис. 1. а) Зависимость величины поля обменного смещения от времени,

б) Поведение вектора намагниченности при разных значениях H_{ext}

Если внешнее магнитное поле меньше поля обменного смещения, для переключения прецессионная смена направления намагниченности должна произойти за время $\Delta\tau$. Если внешнее поле больше поля обменного смещения, то переключение происходит при достижении температуры закрепления. В работе на примере структуры CoFeB(10 нм)/IrMn(10 нм) мы экспериментально наблюдали зависимость порога p от величины внешнего магнитного поля H_{ext} .

Автор благодарит М.В. Сапожникова за предоставленные образцы и П.И. Геревенкова за помощь при проведении экспериментов. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00136, <https://rscf.ru/project/24-72-00136>.

Литература

- [1] A. Barman, et al. *Journal of Physics: Condensed Matter*. **33** (41) 413001 (2021).
- [2] Y. Saito, et al. *Physical Review Applied* **19** (6) 064040 (2023).

Избирательность оптического возбуждения квантовых точек InAs/InGaAs

Г.П. Вейшторг

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Развитие квантовых технологий стимулирует разработку источников одиночных фотонов (ИОФ) на основе эпитаксиальных квантовых точек (КТ). Важным параметром ИОФ является степень однофотонной чистоты, определяемая вероятностью испускания нескольких фотонов за один акт возбуждения. При освещении КТ излучением определенных длин волн, отличных от длины волны излучения данной КТ, наблюдается резонансное возрастание интенсивности фотолуминесценции (ФЛ). Такой режим возбуждения, называемый квазирезонансным, распространён, т.к. позволяет наблюдать высокие степени однофотонной чистоты, однако природа резонансов в конкретных структурах зачастую детально не изучается и фактически не идентифицирована [1].

В работе рассматривается квазирезонансное возбуждение ИОФ телекоммуникационного S -диапазона на основе одиночной КТ InAs/InGaAs в столбчатом метаморфном микрорезонаторе с брэгговскими отражателями [2], а также небольших групп таких КТ в аналогичном резонаторе с малой добротностью. Исследование последних методом спектроскопии ФЛ возбуждения позволило установить наличие резонансов двух типов, отвечающих одновременному возбуждению нескольких или только одной линии в спектре ФЛ. Отсутствие избирательности, присущее резонансам I типа, нетипично и может быть связано с поглощением излучения в образующемся при формировании КТ смачивающем слое и последующей релаксацией носителей заряда в излучающие состояния нескольких КТ. Резонансы II типа вероятно обусловлены рождением носителей на возбужденных уровнях отдельных КТ. Измерения кинетики ФЛ подтверждают качественное различие резонансов двух типов. При возбуждении одиночной КТ было обнаружено несколько квазирезонансов, отвечающих спаду интенсивности ФЛ как по моно-, так и по биэкспоненциальному законам, что предпо-

ложительно связано с принадлежностью резонансов к разным типам. Измерение автокорреляционной функции позволило сделать вывод о том, что неизбирательные квазирезонансы ограничивают степень однофотонной чистоты и бесполезны для возбуждения ИОФ.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (контракт № 868/1734-Д от 22.09.2025).

Литература

- [1] N. Hauser, et al. arXiv:2505.09695 (2025).
- [2] С.В. Сорокин и др. Письма в ЖЭТФ **121**, 37 (2025).

Особенности дальнего поля мощных лазерных диодов с сегментированным контактом

В.С. Вязанкин

АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия

Мощные широкоапертурные лазерные диоды (ЛД) широко применяются в промышленности, медицине, научном приборостроении и других применениях. Однако повышение их выходной мощности ограничивается филаментацией – самопроизвольным образованием в активной среде узких областей с высокой плотностью излучения. Решением этой проблемы является стабилизация модового состава путём создания периодической структуры в контактном слое ЛД.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния геометрии периодической структуры в контактном слое на пространственное распределение интенсивности в дальнем поле излучения ЛД. Конструктивной особенностью таких ЛД является разделение контактного слоя на продольные сегменты, под которыми происходит генерация.

Эксперименты проводились на ЛД с широким меза-полосковым контактом и исследовались четыре типа структур: контрольный образец со сплошным контактом и три варианта сегментированного контакта с различным соотношением размеров излучающих сегментов и пассивных меза-каналов от 1:1 до 1:2.

Установлено, что сегментация подавляет филаментацию и стабилизирует оптическое поле. В результате у всех сегментированных структур в дальнем поле формируется стабильная диаграмма направленности с двумя максимумами (рис. 1), что указывает на возбуждение мод высокого порядка, в отличие от контрольного образца.

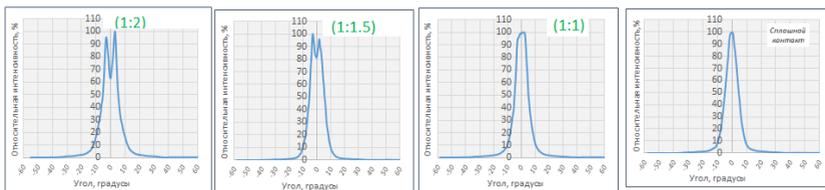


Рис. 1. Распределение интенсивности в дальнем поле излучения в плоскости, параллельной р-п переходу, для ЛД со сплошным и сегментированными контактами.

Увеличение ширины пассивного промежутка между сегментами приводит к росту относительной интенсивности двух главных максимумов и их угловому расхождению.

Экспериментальное наблюдение динамики намагниченности в слоистой МАХ-фазе $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaC}$

А.А. Горшков

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В последние годы в спинтронике возрос интерес к слоистым магнитным материалам [1, 2] благодаря их выраженной анизотропии. К таким материалам относятся и магнитные МАХ-фазы – класс стойких слоистых металлических керамик. Однако динамические магнитные свойства МАХ-фаз до сих пор остаются неисследованными в отличие от, например, Ван-дер-Ваальсовых магнетиков [2]. В данной работе представлено первое экспериментальное исследование лазерно-индуцированной динамики намагниченности в магнитных МАХ-фазах.

В исследовании был выбран состав $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaC}$, обладающий наибольшей намагниченностью насыщения среди известных магнитных МАХ-фаз и температурой магнитного упорядочения $T_C \approx 220$ К [3]. Образец представлял собой 40 нм плёнку на подложке $\text{MgO}(111)$ [3]. Динамика намагниченности изучалась методом фемтосекундной оптической накачки-зондирования с магнитооптическим детектированием по эффекту Керра при угле падения зондирующих импульсов 45° . В эксперименте варьировались температура (70–294 К), внешнее магнитное поле в плоскости плёнки (до 300 мТл) и плотность энергии накачки ($1\text{--}7$ мДж/см²).

Был обнаружен эффект сверхбыстрого размагничивания с аномально большим для металлов характерным временем $t_d \approx 120$ пс. Следует отметить, что высокие значения t_d также наблюдаются в слоистых металлических Ван-дер-Ваальсовых магнетиках [2]. В настоящей работе показано, что доля размагничивания плёнки $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaC}$ не изменяется при температурах $T < T_C$ и обращается в ноль при

$T > T_c$. При увеличении мощности накачки t_d уменьшается, а амплитуда размагничивания выходит на насыщение. Полученные результаты демонстрируют возможность управления намагниченностью с помощью сверхкоротких лазерных импульсов, открывая перспективы применения МАХ-фаз в спинтронике.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-72-00111) под руководством Я.А. Могунова и А.М. Калашниковой.

Литература

- [1] C. Gong et al., Science **363**, 706 (2019).
- [2] T. Lichtenberg et al., 2D Mater. **10**, 015008 (2023).
- [3] A. Petruhins et al., J. Mater. Sci. **50**, 4495 (2015).

Сингулярные поверхностные поляритоны на границе одинаковых одноосных кристаллов

Г.М. Гуткин

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Поверхностные поляритоны (ПП) — это квазичастицы, соответствующие совместным возбуждениям электромагнитных волн и поляризации среды, энергия которых локализована вблизи границ сред. Существует класс ПП, распространяющихся только в анизотропных средах. В качестве примера таких волн стоит упомянуть волны Дьяконова, распространяющиеся вдоль границ прозрачных диэлектриков [1,2]. Среди ПП, распространяющихся в анизотропных средах, с точки зрения математического описания выделяют сингулярные поверхностные поляритоны (СПП), координатные зависимости полей которых подобно зависимостям полей волн Фохта в объёме содержат слагаемые вида $(A+Bx)\exp(\kappa x)$ [3]. Уравнения для таких волн имеют упрощённую структуру, а их решения могут быть использованы при анализе более общих случаев.

В докладе рассматриваются СПП на границе одинаковых одноосных кристаллов [4]. Приводится аналитическое решение задачи определения их параметров и условий существования. Выражения формулируются в терминах параметра анизотропии $\eta = (\varepsilon_{\parallel} - 1)$ и любого из углов α и φ , характеризующих взаимную ориентацию оптических осей кристаллов и направление распространения СПП относительно одной из них, соответственно. Установлено, что СПП существуют тогда и только тогда, когда $\varepsilon_{\perp} > 0$ и $\eta \notin [-4/3; 4/5]$. Обнаружено, что при достаточной степени анизотропии кристаллов на рассматриваемой частоте СПП могут иметь до четырёх пар направлений распространения в гиперболических $(\varepsilon_{\parallel} < 0)$ средах и до

двух – в диэлектрических ($\epsilon_{\parallel} \neq \epsilon_{\perp}$). Для кристалла, в котором поля не имеют фоштовского профиля, СПП могут иметь направления распространения, перпендикулярные или параллельные оптической оси.

Литература

- [1] М.И. Дьяконов. ЖЭТФ **94(4)**, 119 (1988).
- [2] O. Takayama, L. Crasovan, D. Artigas, L. Torner. PRL **102(4)**, 043903-1 (2009).
- [3] T.G. Mackay, C. Zhou, A. Lakhtakia. Proceedings of the Royal Society A **475**, 2228, 20190317-1 (2019).
- [4] К.Ю. Голеницкий, Г.М. Гуткин. ФТТ **67(9)**, 1784 (2025).

Катодолюминесценция ненапряжённых квантовых точек GaAs/AlGaAs: спектральные и динамические особенности

Е.И. Дерибина

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Ненапряжённые квантовые точки (КТ) GaAs/AlGaAs, сформированные методом заполнения нанотверстий (nanohole-filling droplet epitaxy, NFDE), привлекают внимание как перспективные источники одиночных фотонов благодаря малому тонкому расщеплению и высокой оптической однородности. Однако особенности неравновесного переноса и рекомбинации носителей в таких структурах изучены недостаточно, особенно по сравнению с КТ, полученными методом Странски–Крастанова. В настоящей работе исследуется катодолюминесценция (КЛ) NFDE-КТ с акцентом на спектральные свойства излучения и динамику его временной эволюции.

Исследуемая структура была изготовлена методом молекулярно-лучевой эпитаксии. КЛ измерялась в сканирующем электронном микроскопе при 80 К, а фотолюминесценция (ФЛ) — при 4 К. В спектрах КЛ и ФЛ обнаружены две выраженные полосы излучения, условно обозначенные как QD A и QD B, что обычно интерпретируется либо как присутствие двух ансамблей КТ, либо как излучение разных состояний одной точки.

Полученные карты КЛ показывают, что интенсивности линий QD A и QD B имеют совпадающее пространственное распределение. Это указывает на общую локализацию носителей и позволяет связать обе полосы с излучением одних и тех же КТ. В отличие от этого, эмиссия квантовой ямы (КЯ) распределена более равномерно и не коррелирует с локализованными центрами.

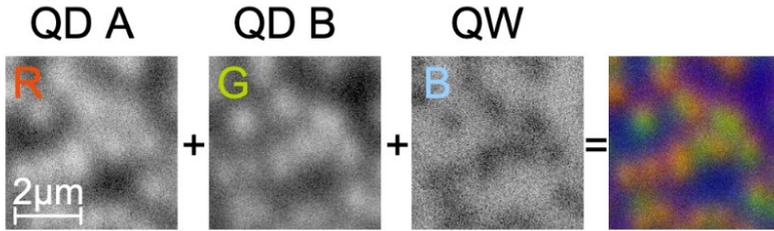


Рис. 1. CL-карты: излучение QD A (красный), QD B (зеленый) и КЯ (синий). Желтый цвет указывает на пространственное совпадение QD A и QD B

Дополнительно проведён анализ временной динамики КЛ при последовательной регистрации изображений при постоянных условиях возбуждения. Обнаружено мигание отдельных КТ.

Потенциал самодействия вблизи границы полупроводник/диэлектрик

С.С. Замолоцких

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Известно, что контраст диэлектрических проницаемостей на границе раздела полупроводник/вакуум или полупроводник/диэлектрик приводит к неинтегрируемой особенности в потенциале взаимодействия электрона с его изображением, что делает неприменимой теорию возмущений для вычисления поправок к энергиям электронов и коэффициента прохождения через барьер [1]. Для регуляризации потенциала самодействия предлагались различные феноменологические модели: линейная интерполяция потенциала вблизи интерфейса [2, 3] или плавная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$ [4]. Поэтому актуальной задачей является построение модели, учитывающей атомарную структуру вещества, но не требующей трудоёмких первопринципных расчетов.

В данной работе, для изучения потенциала самодействия рассматривается модель кристаллической решетки, где каждый атом представляет собой две распределенные по Гауссу плотности заряда $\rho_{\pm}(r) = \pm q(2\pi\sigma^2)^{-3/2} \exp(-r^2/2\sigma^2)$. Путем учёта электростатического взаимодействия этих распределений друг с другом и с точечным электроном, внесённым в систему, был получен несингулярный потенциал самодействия вблизи интерфейса полупроводник/диэлектрик и полупроводник/вакуум. Полученные результаты позволяют определить поверхностный параметр W обобщённых граничных условий, введённых в работе [1], а также рассмотреть задачу о границе сферических квантовых точек.

Автор благодарен Родиной А.В. и Бельтюкову Я.М. за помощь при выполнении работы. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00300.

Литература

- [1] Y.M. Beltukov, A.V. Rodina, A. Alekseev, Al.L. Efros. Applied Physics Review (2025), in print.
- [2] E.A. Muljarov, S.G. Tikhodeev, T. Ishihara. Proc. SPIE **1985**, 784 (1993).
- [3] E.A. Muljarov, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, T. Ishihara. Phys. Rev. B **51**, 14370 (1995).
- [4] F. Stern. Physical Review B **17**, 5009–15 (1978).

Эффекты квантового обратного действия в ансамбле спинов прыгающих электронов

А.Л. Зибинский

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Зависимости спиновой динамики локализованных электронов от внешнего магнитного поля (эффекты Ханле и восстановления поляризации) широко используются для определения времён спиновой релаксации и силы сверхтонкого взаимодействия в эксперименте. Однако, при измерениях спиновой поляризации неизбежно возникает квантовое обратное действие [1], которое может исказить магнитолевые зависимости. Поэтому мы рассмотрели ансамбль локализованных электронов в условиях оптического измерения суммарного спина S_z [2].

Наша модель учитывает прецессию электронных спинов в флуктуирующем поле спинов ядер кристаллической решётки, прыжки электронов между квантовыми точками и квантовое обратное действие зондирующего света: из-за некоммутативности операторов продольной и поперечных компонент спина измерение S_z приводит к разрушению x и y компонент спина.

Мы показали, что в зависимости от направления внешнего магнитного поля влияние квантового обратного действия на спиновую динамику оказывается качественно различным. В геометрии Фарадея измерения приводят к аддитивной перенормировке темпа прыжков, а в геометрии Фойгта, напротив, прыжки и измерения конкурируют. Это приводит к сложной немонотонной зависимости формы кривой Ханле от темпа прыжков и мощности зондирующего луча.

Учёт прыжков и квантового обратного действия приводит к возможности описания параметрически более широкого чем в предыдущих теориях класса экспериментальных кривых Ханле и восстановления поляризации. Из сопоставления теоретических предсказаний модели и измерений спектров спинового шума электронов в квантовой яме CdTe мы определили температурную зависимость скорости прыжков электронов [3].

Автор искренне благодарен научному руководителю Д.С. Смирнову. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-72-10031.

Литература

- [1] N.V. Leppenen and D.S. Smirnov. *Nanoscale* **14**, 13284 (2022).
- [2] A.L. Zibinskiy and D.S. Smirnov. arXiv:2511.10304 (2025).
- [3] A.L. Zibinskiy et al. arXiv:2512.20527 (2025).

Плазмоны и их затухание в грязных сверхпроводящих пленках

Д.К. Карузин

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Мос. обл., Россия.

Упругое рассеяние на примесях в металлах вызывает затухание плазмонов. При превышении скорости рассеяния над плазменной частотой дисперсия становится чисто релаксационной: $\omega(q) = -i\gamma(q)$. В сверхпроводящем состоянии даже в грязных металлах возникают распространяющиеся моды – плазмоны и моды Карлсона Голдмана [1]. Мы разработали микроскопическую теорию на основе келдышевской сигма-модели, показав, что спектр плазмонов определяется проводимостью Маттиса-Бардина на комплексных частотах. Проанализированы дисперсионные законы при низких температурах и вблизи T_c . При нулевой температуре плазмоны становятся незатухающими, а при низких температурах возникает экспоненциально малое затухание.

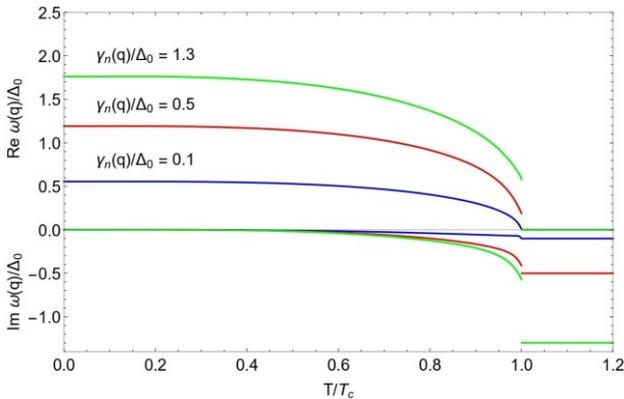


Рис. 1. Температурная зависимость действительной и мнимой части закона дисперсии $\omega(q)$ при разных волновых векторах, характеризующихся разными значениями $\gamma(q)$

При T_c же мгновенно появляется действительная часть частоты, а мнимая часть (затухание) скачком уменьшается. Получены аналитические формулы для этого скачка при произвольных $\gamma(q)$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00297.

Литература

[1] J.E. Mooij and G. Schön. Phys. Rev. Lett. 55, 114 (1985).

Роль межчастичных столкновений в транспортных свойствах двухкомпонентных двумерных электронных систем с параболическим спектром

Е.Е. Колотаева

НГТУ, Новосибирск, Россия

В физике полупроводников и твердотельных наноструктур распространены системы, в которых проводимость обеспечивается несколькими типами носителей заряда. Так, например, в структурах с параболическим спектром электронов кулоновское взаимодействие не даёт вклада в проводимость по причине сохранения полного импульса электронного газа. Однако в многоподзонных структурах инвариантность системы относительно преобразования Галилея оказывается нарушенной, вследствие чего роль электрон-электронного взаимодействия в отклике системы на внешние возмущения становится существенной.

В работе теоретически исследован вклад кулоновского межэлектронного взаимодействия в проводимость двумерной системы электронов с двумя различными эффективными массами. В отличие от процессов рассеяния на примесях, в которых различие эффективных масс проявляется слабо, поправка к проводимости со стороны электрон-электронного взаимодействия оказывается крайне чувствительной к параметрам наноструктуры. При значительном различии эффективных масс электронов низкотемпературная асимптотика вклада межэлектронного взаимодействия в проводимость имеет вид $\propto T^2 \ln T$, при этом знак данного вклада определяется положением уровня Ферми и характеристиками беспорядка в системе.

Автор выражает благодарность Боеву М.В. за вклад в исследование. Работа выполнена в рамках государственного задания FSUN-2023-0006 и при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант # 24-1-3-33-1).

Эпитаксиальный рост плёнок магнитного топологического изолятора $(\text{MnTe})_m(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$

Е.Д. Кырова

ИФП СО РАН, Новосибирск, Россия

Материалы на основе $A^V B^VI$ ($A = \text{Sb}, \text{Bi}; B = \text{Se}, \text{Te}$) относятся к классу топологических изоляторов и широко исследуются для разработки устройств спинтроники и квантовых вычислений [1]. Добавление Mn в систему позволяет проводить исследования уникальных свойств материала, таких как квантовый аномальный эффект Холла, квантовый спиновый эффект Холла и др. Кристаллическая решётка соединения MnBi_2Te_4 представляет собой Ван-дер-Ваальсову слоистую структуру $\text{Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te}$. Большая часть образцов MnBi_2Te_4 , описанных в литературе [2, 3], получены объёмными методами. Однако для практического применения необходимо получение тонких плёнок большой площади.

В данной работе плёнки $(\text{MnTe})_m(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ были выращены на подложках Si(111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии при температурах $T_{\text{подл}} \approx 320\text{-}370$ °С. В качестве источников использовались элементные Mn, Te и бинарное соединение Bi_2Te_3 . С помощью методов *in situ* контролировались скорость роста и качество кристаллической структуры. Толщина плёнок составляла 10-50 нм, которая была определена по измерениям *ex situ* методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Согласно АСМ измерениям морфологии плёнок рост происходит по ступенчатослоевому механизму. Образцы, полученные при параметрах роста близких к оптимальным, имеют наиболее гладкую морфологию поверхности $\text{RMS} \approx 0,8$ нм и стехиометрию, близкую к оптимальной, MnBi_2Te_4 . Обнаружено, что при неоптимальных условиях роста на поверхности плёнок образуется дополнительная фаза материала в виде включений Mn-Te, что подтверждается данными рентгеновской дифракции. Исследование методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показало наличие в спектре Mn $2p$ пика, соответствующего зарядовому состоянию Mn^{+1} , предположительно, возникающему в нанокластерах субтеллурида марганца Mn_2Te .

Автор выражает благодарность Д.В. Ищенко, А.С. Микаевой, Е.В. Федосенко, О.Е. Терещенко. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 25-62-00004

Литература

- [1] Y. Tokura, et al. Nature Reviews Physics, **1**, 126–143 (2019).
- [2] L. Shuai, et al. National Science Review, **11**, 296 (2024).
- [3] T. Weilun, et al. Quantum Frontiers (2022).

Микроскопические упругие свойства аморфных нано-композитов

И.О. Райков

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Добавление наночастиц разной формы и размера в полимерную матрицу делает возможным получение легких нанокомпозитов с выдающимися механическими свойствами. Многие используемые для этого полимеры аморфны, и на малых масштабах проявляют неоднородность физических свойств, делая неприменимой классическую континуальную теорию упругости. Это играет роль в свойствах нанокомпозитов с размером частиц, сравнимым с масштабом неоднородности. К примеру, известно, что наночастицы оказывают большее влияние на упругие свойства нанокомпозита, чем более крупные включения с той же объёмной долей [1].

Ранее были получены теоретические результаты [2], описывающие эффект повышения упругости материала вблизи жестких нановключений за счёт подавления неаффинных деформаций в аморфной матрице вблизи интерфейса, что приводит к увеличению упругой энергии и, тем самым, жесткости системы. Решение уравнения $\alpha(r) = \xi^2 \Delta \ln(1 + \alpha(r))$ на упругий контраст $\alpha(r)$ описывается масштабом неоднородности ξ . В настоящей работе были произведены молекулярно-динамические симуляции с целью проверки этих теоретических предсказаний.

Были рассчитаны локальные упругие модули при деформации между жесткими стенками для полистирола и модельных полимеров Кремера-Греста, и показано хорошее соответствие численных результатов теории. Масштаб неоднородности совпадает с корреляционным радиусом неаффинных деформаций [3], показывая связь повышения жесткости с подавлением неаффинных деформаций. Увеличение модуля упругости полимерной матрицы вблизи жестких границ может достигать двух раз и проникать вглубь полимерной матрицы на множество межатомных расстояний от границы.

Автор выражает благодарность Я.М. Бельтюкову и Д.А. Конюху. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 22-72-10083-П.

Литература

- [1] J. Cho, M.S. Joshi, C.T. Sun. *Compos. Sci. Technol.* **66**(13), 1941 (2006)
- [2] D.A. Conyuh, A.A. Semenov, Y.M. Beltukov. *Phys. Rev. E* **108**, 045004 (2023)
- [3] D.A. Conyuh, D.V. Babin, I.O. Raikov, Y.M. Beltukov. *arXiv:2505.04554* (2025)

Экситонный энергетический спектр и оптические переходы в сферических нанокристаллах InP/ZnSe

К.И. Русских

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Химически синтезированные нанокристаллы (НК) на основе InP с полупроводниковыми оболочками ZnSe или ZnS обладают высоким квантовым выходом и являются перспективными для создания оптоэлектронных приборов. Влияние оболочки на экситонный спектр и оптические переходы в таких НК является предметом активных исследований и дискуссии [1,2]. Возможность формирования различных связей на гетероинтерфейсе (P-Zn или In-Se) приводит к появлению разнонаправленных диполей, влияющих на величину потенциального барьера для дырки U_B^h и электрона U_B^e , сохраняя их сумму равной разнице запрещённых зон. В работах [1,2] предложены противоположные интерпретации высоты барьера U_B^h .

В работе изучена энергетическая структуры и междузонные оптические переходы в сферических НК ядро/оболочка InP/ZnSe в 8-зонной модели Кейна для электрона и 6-зонного Гамильтониана Латтинжера для дырок в зависимости от величины U_B^h . Проведён расчёт энергетических уровней электрона со значениями орбитального момента $l=0$ (S_e) и 1 (P_e). Четырёхкратно $S_{3/2}$, $P_{3/2}$ и двукратно $S_{1/2}$, $P_{1/2}$ вырожденные состояния дырок найдены с учетом смешивания состояний из подзон Γ_8 (тяжёлые и лёгкие дырки) и Γ_7 (спинорбитально-отщепленные) и характеризуются полным моментом $\mathbf{j}=\mathbf{J}+\mathbf{I}$ ($j=3/2$), где $\mathbf{J}=\mathbf{I}+\mathbf{s}$, \mathbf{I} ($I=1$) – внутренний орбитальный момент и спин $s=1/2$. На интерфейсе с конечными потенциальными барьерами U_B^h и U_B^e используются стандартные граничные условия, сохраняющие значение компонентгибающей волновой функции и нормальных скоростей. Учёт кулоновского взаимодействия проведён в рамках теории возмущения. Интенсивность междузонных оптических переходов рассчитана в дипольном приближении. Полученные результаты расчетов хорошо описывают экспериментальные спектры одно- и двухфотонного возбуждения фотолюминесценции, а также дифференциального поглощения из работы [2]. Это позволяет определить высоту потенциальных барьеров для дырки и электрона и влияние диполей на интерфейс.

Автор выражает благодарность А.А. Головатенко и А.В. Родиной. Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ №23-12-00300.

Литература

- [1] F.S. Velosa et. al. Adv. Opt. Mater. **10**, 2200328 (2022).
- [2] D. Respekta et. al. ACS Nano **19**(21), 19831 (2025).

Резонансные дифракционные решетки на основе галогенидных перовскитов

А.Ю. Самсонова

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Экситоны в полупроводниках эффективно взаимодействуют со светом, обладают нелинейно-оптическими свойствами и чувствительны к внешним воздействиям. Перечисленные свойства делают возможным создание экситонных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), концепция которых была впервые предложена в работе [1]. В экситонных ДОЭ осуществляется модуляция резонансного отклика экситонов, что приводит к возможности управления светом за счет превращения плоского волнового фронта в пространственно-модулированный фронт на резонансной энергии. Главное отличие экситонных ДОЭ от традиционных состоит в том, что дифракция на таких элементах происходит только вблизи частоты экситонного резонанса, а вне резонанса элемент «прозрачен».

В работе созданы экситонные дифракционные решетки на основе галогенидных перовскитов с помощью облучения сфокусированными ионным [2] и электронным пучками. При таком облучении вводятся дефекты без изменения рельефа поверхности, что приводит к увеличению неоднородного уширения экситонного резонанса. В работе [2] продемонстрирован резонансный характер дифракции и ее температурная перестройка для решетки на основе перовскита CsPbBr₃, и в недавних исследованиях – на основе поликристаллической пленки MAPbI₃. Также проведены измерения отражения от облученного перовскита MAPbCl₃ для определения возможности будущих применений в экситонных ДОЭ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007 на оборудовании РЦ СПбГУ «Нанопотоника», «Рентгенодифракционные методы исследования». Автор выражает благодарность Университету ИТМО и лаборатории Кристаллофотоники СПбГУ за предоставленные образцы и соавторам Е.А. Башегуровой, Е.И. Дербиной, Р.С. Назарову, М.С. Ложкину, Ю.В. Капитонову.

Литература

- [1] Yu.V. Kapitonov et al. Phys. Status Solidi B. **250**, 10 (2013).
- [2] М.Р. Mamaeva et al. Adv Opt Mater. **11**, 5 (2023).

Электронная структура поверхности $\text{Na}_2\text{KSb}(111)$ до и после активации слоями (Cs, Sb)

Н.Ю. Соловова

ИФП СО РАН, Новосибирск, Россия

Антимониды щелочных металлов, в том числе $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$, активно применяют для создания фотокатодов. А в 2022 г. была показана возможность эмиссии спин-поляризованных электронов из такого фотокатода [1]. Одной из перспективных задач является получение кристаллически-упорядоченных соединений Sb и щелочных металлов. Структура поверхности может влиять на такие характеристики фотокатода, как квантовая эффективность и угловое распределение фотоэмитируемых электронов, а технология эпитаксиального роста позволит формировать напряженные слои или гетеропереходы для дальнейшего улучшения характеристик.

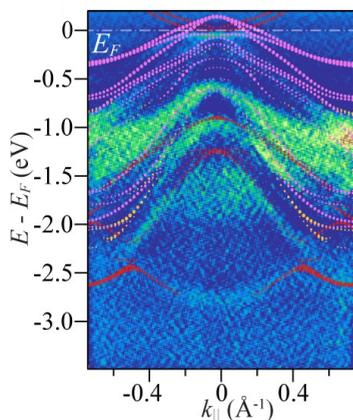


Рис. 1. Дисперсионная зависимость $\text{Na}_2\text{KSb}(111)$, полученная методом ARPES в направлении К-Г-К.

расчеты электронной структуры по теории функционала плотности поверхности $\text{Na}_2\text{KSb}(111)$ С.В. Еремеева.

Литература

- [1] V.S. Rusetsky, V.A. Golyashov, S.V. Eremeev, D.A. Kustov, I.P. Rusinov, T.S. Shamirzaev, A.V. Mironov, A.Yu. Demin, O.E. Tereshchenko. PRL **129**(16), 166802 (2022).

Гребёнки резонансов Фано и сингулярности параметра Фано в рассеянии света диэлектрическими частицами

Г.С. Чекмарев

ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Асимметричные резонансные линии, возникающие при интерференции узкого резонанса и широкого фона, были описаны Уго Фано и сегодня активно исследуются в фотонике [1], в частности в контексте формирования гребёнок резонансов Фано [2], что открывает возможности для многоканальных сенсоров. В нашей работе [3] показано, что такие гребёнки возникают и в диэлектрических резонаторах различных геометрий: кольцах, разомкнутых кольцах и параллелепипедах. Аналитически и экспериментально исследованы перекрывающиеся резонансы Фано, связанные с модами Фабри–Перо. Теория квазинормальных мод позволяет напрямую определять параметр Фано и интенсивности линий, обеспечивая точный анализ спектров (Рис. 1а). Кроме того, обнаружены сингулярные точки параметра Фано, в которых небольшое изменение угла падения φ приводит к резкому изменению асимметрии (Рис. 1б–с). Вблизи таких точек профиль линии превращается из пика в провал. Это создаёт новые возможности для высокочувствительных оптических датчиков.

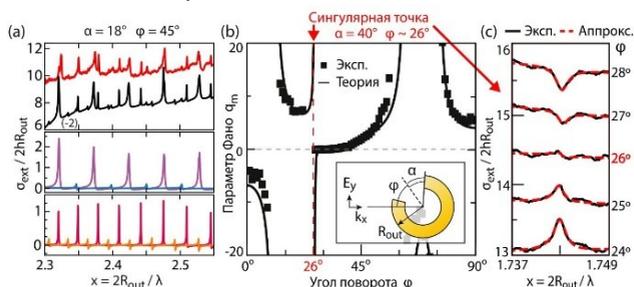


Рис. 1. (а) – экспериментальные и теоретические спектры рассеяния разомкнутого кольцевого резонатора ($\alpha = 18^\circ$, $\varphi = 45^\circ$), включая вклад симметричных и антисимметричных мод. (б) – параметр Фано в зависимости от угла падения φ для резонатора с $\alpha = 40^\circ$; показана схема возбуждения и выделена сингулярная точка при $\varphi \approx 26^\circ$. (с) – изменение формы линии вблизи сингулярной точки.

Литература

- [1] M.F. Limonov et al. Nat. Photon. **11**, 543 (2017).
- [2] J.T. Marmolejo, A. Canales, D. Hanstorp, R. M'endez-Fragoso. PRL **130**, 043804 (2023).
- [3] M. Bochkarev, N. Solodovchenko, G. Chekmarev et al. PRB, **122**(8), L081102 (2025).

Стендовая конкурсная сессия с докладами молодых ученых

Optical properties of mixed halide perovskites for modern solar cells

Qinghao Song

School of Physics and Engineering, ITMO University, Sanit Petersburg, Russia

Lead halide perovskite solar cells demonstrate high efficiency under both standard AM1.5 G illumination and low-light conditions [1]. An efficient light management is critical for optimizing performance in both environments, but optical constants (permittivity and permeability) for many widely used mixed perovskite compositions remain uncharacterized, hindering precise optical calculations [2].

In this work, we employed a combined experimental and simulation methodology for MAPbI_3 , $\text{MAPb}(\text{IBr})_3$, and $\text{CsMAFAPb}(\text{IBr})_3$ thin-films. Firstly, the complex refractive indices of three perovskite compositions have been measured by spectroscopic ellipsometry. Subsequently, these experimentally obtained optical constants were integrated into CST Microwave Studio to construct and simulate ATR spectra in the full PSC's device models.

This work establishes a reliable simulation framework that bridges material properties with device-level performance, providing a powerful tool for the virtual screening and optical optimization of next-generation perovskite compositions for high-efficiency, low-light photovoltaics.

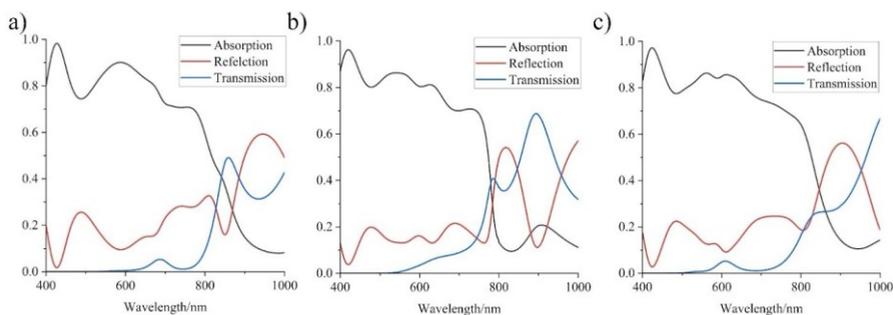


Figure 1. ATR spectra. (a) $\text{CsMAFAPb}(\text{IBr})_3$; (b) MAPbI_3 ; (c) $\text{MAPb}(\text{IBr})_3$

Reference

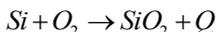
- [1] L.-Ch. Kin, et al. Cell Rep. Phys. Sci. **3**, 11 (2022).
- [2] A. Tchenka, L. Amiri, M. Bousseta, et al. J. Phys. Chem. Solids **206**, 112849 (2025)

Механизм экзотермической реакции пористого кремния в контакте с окислителем.

В.В. Гришунов

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Пористый кремний – материал, получаемый при электрохимическом травлении монокристаллического кремния. Основная особенность его заключается в том, что он обладает крайне большой удельной площадью поверхности, которая может достигать величины более $500 \text{ м}^2/\text{см}^3$. Этим зачастую объясняют аномально высокое энерговыделение в процессе экзотермической реакции в энергонасыщенных композитах (ЭНК) на его основе. Тем не менее, в настоящее время в литературе отсутствуют работы, объясняющие механизм экзотермической реакции пористого кремния с окислителем. В настоящей работе предложен механизм экзотермической реакции пористого кремния с кислородом:



В данной реакции кремний выступает в качестве горючего с энергетическим выходом $\sim 28 \text{ кДж/г}$ [1]. В пористом кремнии, вследствие понижения симметрии кристаллической решетки, появляется дополнительный минимум в Γ -точке с энергией равной 2.5 эВ [2]. В результате оптического возбуждения пористого кремния возникают горячие электроны с энергий порядка $2.1\text{--}2.5 \text{ эВ}$. Как хорошо известно, энергетические уровни в молекуле кислорода описываются в рамках метода молекулярных орбиталей: характерная энергия перехода между связывающими и не связывающими орбиталями порядка 2.5 эВ . Следовательно, возможен резонансный переход, при котором связь в молекуле кислорода рвется и активные атомы кислорода вступают в химическую реакцию с кремнием. В основу теоретической модели легла теория цепных реакций Семенова [3]. В настоящей работе впервые вычислена вероятность такого процесса, оценен энергетический выход реакции и оценены константы реакции в рамках теории RRKM.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-12-00426. Автор благодарит Д.М. Самосвата, Г.Г. Зегрю и В.П. Улина за полезные обсуждения.

Литература

- [1] D. Kovalev, V.Yu. Timoshenko, N. Künzner, E. Gross, F. Koch. Phys. Rev. Lett. **87**(6), 068301-1. (2001)
- [2] K. Kusova, P. Napala, J. Valenta, P. Jelinek, O. Cibulka, I. Ondik, I. Pelant. Adv. Mater. Interfaces **1**, 1300042 (2014).
- [3] Семенов Н.Н., Цепные реакции. М. Наука – 1986. – 535 с.

Сопротивление р-п-перехода на основе квантовых точек

В.И. Гусев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

СПБАУ им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

Одним из направлений в разработке эффективных фоточувствительных устройств является создание фоточувствительного элемента на основе квантовых точек (КТ). Такие точки представляют собой полупроводниковые кристаллы (например, CdSe), полученные коллоидным методом синтеза и имеющие характерные размеры от 3 до 10 нм. В основе архитектуры фоточувствительных устройств лежит р-п-переход, состоящий из легированных слоев КТ р- и п-типа. Подобная архитектура значительно упрощает изготовление и снижает ограничение минимального шага фоточувствительных элементов [1]. Ключевой проблемой таких устройств является низкая подвижность и проводимость носителей заряда внутри слоев КТ. Это связано с поверхностными дефектами, которые образуют центры захвата носителей заряда, а также с образованием компенсированных слоев КТ, в которых концентрация квантовых точек р- и п-типа сопоставима. Кроме того, на электрические и оптические свойства влияет разброс размеров квантовых точек в слое.

В данной работе представлена теоретическая модель р-п-перехода на основе квантовых точек, которая учитывает беспорядок по размерам квантовых точек и беспорядок в распределении примесей. С помощью компьютерного моделирования были получены энергетические диаграммы и зависимость ширины области пространственного заряда от уровня легирования. Получена плотность состояний р-п-перехода, в которой наблюдается кулоновская щель, являющаяся следствием беспорядка в распределении легирующих примесей в соответствии с критерием Эфроса-Шкловского [2]. Было установлено, что высокая компенсация легирования слоев КТ приводит к сильному разбросу энергетических состояний, что влияет на подвижность носителей заряда и время релаксации фотоотклика. Также было рассчитано сопротивление р-п-перехода и величина теплового шума тока в зависимости от уровня беспорядка.

Литература

- [1] V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, I.A. Shuklov, et al. Russ. Chem. Rev. **93(4)**, RCR5113 (2024)
- [2] B. Skinner, T. Chen, B.I. Shklovskii. Phys. Rev. B **85**, 205316 (2012).

Связанные состояния в континууме в полупроводниковой гетероструктуре $\text{InAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Е.В. Доморацкий

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Энергетический спектр полупроводниковых гетероструктур в общем состоит из дискретных уровней энергии, соответствующих локализованным (связанным) состояниям, а также из непрерывной области энергий, соответствующей распространяющимся волнам. Первые формируются при энергиях ниже высоты квантовых барьеров, тогда как при энергиях выше барьеров реализуются пространственно делокализованные состояния, образующие континуум распространяющихся волн. Существует особый случай – связанные состояния в континууме (ССК), предсказанные в 1929-ом году Вигнером и Нейманом [1]. Хотя энергия таких резонансов расположена в области континуума, сами состояния являются связанными, а их волновые функции остаются локализованными.

Вообще говоря, ССК представляют собой общее волновое явление, проявляющееся не только в рамках квантовой механики, но наблюдаемое также и в оптике [2], и в акустике [3]. На текущий момент квантовомеханические ССК экспериментально не наблюдались, хотя теоретически их появление предсказано и в полупроводниковых сверхрешетках [4,5].

Варьирование состава полупроводниковых растворов, образующих гетероструктуры, позволяет изменять зонную структуру и гибко варьировать распределение потенциала, что крайне перспективно для реализации и наблюдения ССК в подобных системах. Таким образом, изменяя состав гетероструктуры, можно управлять положением энергии ССК в спектре и степенью его пространственной локализации.

В работе анализ ССК для многобарьерной гетероструктуры на основе твёрдого полупроводникового раствора $\text{InAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ проводится в рамках метода эффективной массы и метода псевдопотенциала, делается вывод о вкладе микроскопических эффектов в анализ ССК в полупроводниковых гетероструктурах. Показывается, что в рассматриваемой системе возможно существование ССК, обладающего высокой степенью локализации и высокой добротностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №25-79-31027.

Литература

- [1] J. von Neumann, E.P. Wigner. *Phys. Z.*, 30 (1929).
- [2] Z. Sadrieva, K. Frizyuk, M. Petrov, et al. *Phys. Rev. B*, **102**, 075103 (2020).
- [3] I. Deriy, I. Toftul, M. Petrov, A. Bogdanov. *Phys. Rev. Lett.*, **128**, 084301 (2022).
- [4] D.R. Herrick. *Physica B+C* **85**, 44 (1976).
- [5] C. Hsu, B. Zhen, A. Stone, et al. *Nat. Rev. Mater.*, **1**, 16048 (2016).

Фото- и термоиндуцированные сдвиги в оптических свойствах нанокompозитов с частицами As_2S_3 и Au

Г.Э. Зедоми

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы спектры пропускания пленок полимерного композита с наночастицами As_2S_3 и Au в диапазоне длин волн 400–800 нм. Измерения проводились сразу после изготовления пленок, после отжига при температуре 140 °С в течение часа и после воздействия лазерного излучения ($\lambda = 532$ нм, 20 Вт/см²).

Наблюдались эффекты противоположные классическому поведению массивных пленок As_2S_3 . Термоотжиг вызывает смещение края поглощения в сторону длинноволновой области (до 500 нм), в то время как последующее лазерное облучение приводит к его синему сдвигу (до 450 нм). Наночастицы Au выступают как усилитель фотоиндуцированных процессов. В системе без золота (полимер- As_2S_3) термоиндуцированный сдвиг достигал более 400 мЭВ, а фотоиндуцированный – около 40 мЭВ. В системе с золотом термоиндуцированный сдвиг проявляется слабее, однако фотоиндуцированный сдвиг усилен и восстанавливает положение края поглощения до исходного состояния. Эффекты демонстрируют воспроизводимость при многократных циклах «нагрев-облучение».

Применяя правило Урбаха [1] для оценки ширины хвоста неупорядоченных состояний установлено, что термообработка увеличивает ширину размытия края, а лазерное облучение уменьшает неупорядоченность. Для композита с золотом размытие составляло 0,612 эВ (исходное состояние) и 0,810 эВ (после отжига); без золота: 0,674 эВ и 0,727 эВ соответственно.

Наблюдаемые эффекты могут быть обусловлены способностью As_2S_3 формировать метастабильные состояния. Отжиг способствует переходу системы в низкоэнергетическое состояние, повышая уровень неупорядоченности. Лазерное воздействие вызывает структурную перестройку в сторону исходной конфигурации. Наличие золота усиливает фотоиндуцированные переходы и подавляет термическую релаксацию, изменяя диапазон метастабильных состояний.

Автор выражает благодарность Л.В. Котовой, Ю.Э. Бурунковой, В.Е. Тарасову, В.П. Кочерешко. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 25-22-20074) и Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с договором № 25-22-20074 от 05 июня 2025 г.

Литература

- [1] Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: МИР, 1974. 474 с.

Эффект аномальной температурной зависимости дислокационной люминесценции в ионно-имплантированном кремнии

А.А. Зотов

ИФТТ РАН, Черноголовка, Россия

МИФИ, Москва, Россия

На сегодняшний день одной из основных проблем развития кремниевой оптоэлектроники является создание источника излучения на основе кремния. Данный полупроводник является непрямозонным, что обуславливает низкий квантовый выход люминесценции. Одним из способов решения данной задачи является использование таких структурных дефектов в Si, как дислокации. Для генерации данных дефектов может быть использован технологичный метод ионной имплантации с последующей термообработкой кристалла Si.

В данной работе приводятся экспериментальные данные, показывающие, что применение дополнительной имплантации примеси бора в дислокационную область кремния приводит к возникновению эффекту аномальной температурной зависимости дислокационной люминесценции (ДЛ). Данный эффект заключается в существенном росте интенсивности линии D1 ДЛ при увеличении температуры (рис.1). Обсуждается возможный механизм наблюдаемого эффекта.

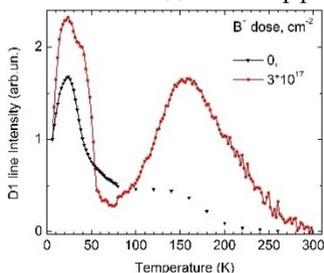


Рис. 1. Зависимость интенсивности полосы D1 ДЛ от температуры для образцов без дополнительной имплантации B⁺ и с дополнительной имплантацией B⁺ дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Образцы прошли дополнительные отжиги при температуре 830 °C в течение 1 часа. Кривые нормированы на интенсивность при 6 К

Литература

- [1] A.N. Tereshchenko, A.A. Zotov, D.S. Korolev, A.A. Nikolskaya, A.N. Mihaylov, A.I. Belov, D.I. Tetelbaum. J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. S1, T18 (2024).

Исследование модуля Юнга и изменения ширины запрещённой зоны в перовскитах CsPbX_3 под воздействием давления

В.Л. Калиниченко

Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Галогенидные перовскитные наночастицы (НЧ) являются перспективными материалами для оптоэлектроники [1, 2], однако их механические свойства исследованы недостаточно, что ограничивает их применение в гибкой и работающей под давлением электронике. В данной работе впервые методом атомно-силовой микроскопии с применением зонда с плоским основанием (см. рис. 1, а) был точно измерен модуль Юнга кубических НЧ CsPbBr_3 и CsPbCl_3 .

Установлено, что модуль Юнга имеет размерную зависимость, увеличиваясь для НЧ меньшего размера, из-за вклада поверхностных ионов в кристаллах с более высокой энергией связи. Средние значения модуля Юнга одиночных НЧ составили 16,3 ГПа для CsPbBr_3 и 22,4 ГПа для CsPbCl_3 . Расчеты теории функционала плотности выявили сужение запрещённой зоны при сжатии, особенно для CsPbCl_3 (см. рис. 1, б). Полученные данные важны для разработки гибких и работающих под давлением устройств, таких как подводные солнечные элементы и носимые сенсоры.

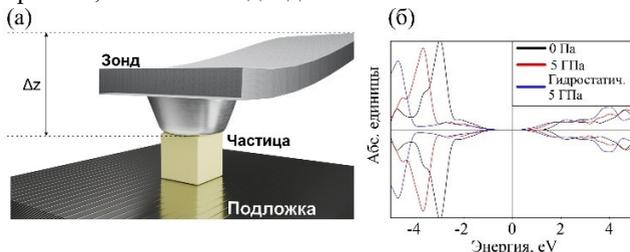


Рис. 1. (а) Схема эксперимента; (б) Плотности состояний CsPbCl_3 под воздействием различного давления

Исследование выполнено за счет гранта РФФ (№ 24–79–10131). Автор благодарен К.А. Гасниковой, А. Махмудпуру, Ю.А. Мельчаковой, В.М. Кондратьеву, С.В. Макарову, П.А. Алексееву и А.Д. Фурасовой за полезные обсуждения и помощь в проведении экспериментов.

Литература

- [1] Jesna George K et al. Inorganic Chemistry Frontiers **7**, 14 (2020).
- [2] Son-Tung Ha et al. Chemical Science **8**, 4 (2017).

Смесовые диэлектрические пленки MgF_2+ZnS для светоизлучающих диодов

А.А. Караваева

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Современные исследования в области светоизлучающих диодов (СИД) направлены на улучшение их излучательных характеристик. Для повышения оптической эффективности СИД используется тыльный отражатель, формируемый в процессе постростовой обработки структур. Его задача — перенаправить излучение от р-п-перехода в сторону лицевой поверхности прибора.

Для повышения коэффициента отражения такой тыльный зеркальный отражатель (металл) отделяют диэлектрическим слоем от полупроводника, обеспечивая дополнительную защиту последнего.

Проводились исследования диэлектрических слоев MgF_2 и Si_3N_4 , встраиваемых в $AlGaAs/GaAs$ инфракрасных СИД. Сравнение оптических характеристик СИД с двуслойными «металл-диэлектрик» отражателями показало преимущество использования MgF_2 : внешний квантовый выход прибора изменился с 16,4% (при слоях Si_3N_4) до 17% (при MgF_2).

Установлена причина нестабильности излучательных характеристик СИД: растрескивание слоя MgF_2 . При кратковременной (до 30 секунд) высокотемпературной ($400^\circ C$) обработке, соответствующей режиму вжигания контактов, пленка MgF_2 растрескивалась, что связано со значительным растягивающим внутренним напряжением.

Решение проблемы заключалось в использовании смесовых MgF_2+ZnS пленок. Сжимающие напряжения ZnS в смесовой пленке позволили компенсировать растягивающие напряжения MgF_2 при температурной обработке. Смесовая пленка толщиной 100 нм формировалась в вакууме при одновременном термическом испарении MgF_2 и ZnS на подложку $GaAs$. В результате отжига структур в течение 1 минуты при температурах 200, 300, $400^\circ C$ трещин и дефектов на поверхности смесовых MgF_2+ZnS пленок обнаружено не было. Сохранились и высокие оптические свойства пленок: для разных соотношений концентраций MgF_2 и ZnS коэффициент отражения на границе полупроводник-металл составлял 7%-7,5%. Таким образом, показана перспективность использования смесовых MgF_2+ZnS пленок при формировании тыльных отражателей в структурах СИД.

Работа выполняется за счет средств государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе (тема FFUG-2025-0007).

Исследование механических напряжений в гетероструктурах GaN/AlGaN на подложках SiC во время эпитаксии

Б.Ю. Клюев

НТЦ Микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

При эпитаксии гетероструктур GaN/AlGaN на подложках SiC, вследствие различия коэффициента термического расширения (КТР) подложки и выросших слоев, при остывании возникают большие напряжения в структурах. Это является одной из наиболее серьезных проблем эпитаксиального роста нитридов на SiC подложках. В нашем случае возникают растягивающие напряжения, поскольку КТР GaN ($5,59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) больше, чем КТР SiC ($4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Решением этой проблемы является управляемое создание упругих напряжений в слоях во время эпитаксии с противоположным знаком, чтобы, при остывании, они компенсировали напряжения, связанные с КТР. Напряжения, возникающие в слоях, оказывают изгибающий момент на подложку, она искривляется, и величина кривизны подложки напрямую связана с величиной упругих напряжений. Поэтому, исследуя эволюцию кривизны подложки во время роста, можно понять изменение упругих напряжений. Создание упругих напряжений в растущих слоях осуществляется за счет разницы параметров решетки двух и более растущих слоев AlN/GaN или их твердых растворов. Однако при росте слоев с различными параметрами решетки, условия роста могут оказывать существенное влияние на когерентность роста решеток, на образование дефектов, и как следствие – на релаксацию упругих напряжений в растущем слое. В работе приводятся экспериментальные данные по исследованию влияния давления на начальных стадиях роста на кривизну структур GaN/AlGaN на подложках SiC (рис.1).

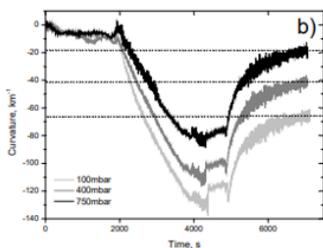


Рис. 1. Кривизна структуры от времени роста для различных давлений на начальной стадии

Как видно из рисунка, при изменении давления релаксация упругих напряжений изменяется, что позволяет управлять конечной кривизной всей структуры.

Работа выполнена в НТЦ Микроэлектроники РАН.

Синтез и исследование люминесценции ортофосфатов иттрия и лютеция, активированных Eu^{3+}

И.В. Коклюшкина

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Ортофосфаты иттрия и лютеция – перспективный материал для создания сцинтилляторов, люминофоров и термолюминесцентных дозиметров. Основными дефектами в данных материалах являются вакансии кислорода. Они служат как центрами окраски в кристаллах, так и ловушками носителей заряда. Ранее было показано, что распределение вакансий кислорода в кристаллах ортофосфатов иттрия и лютеция неоднородно вследствие того, что данные материалы обладают униаксиальным направлением кристаллической решетки. Целью работы было синтезировать кристаллы ортофосфатов иттрия и лютеция, активированных трехвалентными ионами европия, и исследовать их люминесцентные свойства.

В рамках исследования были выращены кристаллы ортофосфатов иттрия и лютеция, активированных ионами трехвалентного европия, методом флюса. Размер кристаллов составлял порядка единиц миллиметров. Расчетное содержание европия в кристаллах составляло 0,1 ат%. Состав кристаллов определялся методом рентгеноспектрального микроанализа. Структурные параметры кристаллов были охарактеризованы методом рентгенодифракционного фазового анализа, в частности, были определены фазовый состав кристаллов, параметры элементарной ячейки и микродифракции.

Основным методом исследования был метод локальной катодолюминесценции (КЛ). Были получены и интерпретированы спектры КЛ. Они включали в себя как полосы собственных дефектов, связанных с дефектами дефицита кислорода, так и полос люминесценции, связанных с внутрицентровыми $f-f$ переходами иона Eu^{3+} . Были измерены времена затухания полос КЛ. Доля безызлучательной рекомбинации в кристаллах коррелировала с результатами рентгенодифракционного фазового анализа.

Было показано, что в кристаллах ортофосфатов как иттрия, так и лютеция присутствуют ловушки носителей заряда, влияющие на люминесценцию европия. Обсуждается модель передачи возбуждения от собственных дефектов ионам европия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00112.

Метаповерхности Гюйгенса на основе материала с фазовой памятью

А.Р. Колесникова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Метаповерхности – это фотонные структуры для управления электромагнитными волнами. Несмотря на бурное развитие исследований и применения метаповерхностей, остается актуальным вопрос о повышении их функциональной способности, когда одна и та же структура может обладать разными свойствами. Одним из возможных решений являются перестраиваемые метаповерхности на основе материалов с фазовой памятью, таких как GST.

В данной работе исследуются метаповерхности Гюйгенса в телекоммуникационном диапазоне на основе GeSbTe (GST) – материала с фазовой памятью. Динамическое управление их оптическими свойствами осуществляется за счёт переключения между аморфной и кристаллической фазами GST (Рис. 1).



Рис. 1. Принцип работы исследуемой метаповерхности Гюйгенса.

В рамках численного исследования были определены геометрические параметры сферических наночастиц GST, удовлетворяющих условиям Керкера. Показано, что одна и та же частица обеспечивает преимущественное рассеяние света вперёд или назад при определенных значениях длин волн.

На основе этих частиц были смоделированы метаповерхности Гюйгенса, которые демонстрируют режимы "включения" и "выключения" пропускания, переключение между которыми осуществляется изменением фазы материала. Спектральным положением резонансов пропускания и отражения метаповерхности можно управлять, варьируя период решётки.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект № 25-79-10137).

Литература

[1] M. Brongersma, et al. Nat. Rev. Electr. Eng. **2**, 125–143 (2025)

Применимость DDD-метода для оценки радиационной стойкости метаморфных фотоэлектрических преобразователей излучения

П.Д. Корниенко

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Одной из причин деградации фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) излучения, или солнечных элементов, является воздействие высокоэнергетических частиц (электронов и протонов), приводящее к образованию дефектов в структуре, что вызывает ухудшение основных фотоэлектрических параметров приборов (тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, выходной мощности и КПД).

Метод прогнозирования радиационной деградации, предложенный NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL-метод) [1], разрабатывался для «классических» солнечных элементов на основе GaAs и Si и опирался на обширную базу экспериментальных данных. Получена высокая надежность прогнозирования, однако применение метода к ФЭП новых конструкций и материалов требует проведения ориентированных наземных испытаний с использованием значительного количества дорогостоящих образцов. Эффективной альтернативой JPL-методу является метод Naval Research Laboratory [2], который позволяет получать универсальные для любого типа частиц деградационные зависимости от дозы структурных повреждений (Displacement Damage Dose – DDD) и требует меньших затрат на радиационные испытания. Метод базируется на модельном определении неионизационных потерь энергии (NIEL) в материале, используя общий формализм взаимодействия излучения с веществом и такие физические параметры, как пороговая энергия смещения атомов E_d .

В работе рассматривается применимость DDD-метода к ФЭП на основе метаморфных гетероструктур. Задача заключается в определении оптимальных параметров для данной модели (в частности величины E_d для трехкомпонентных соединений, таких как InGaAs) в зависимости от состава и типа внутренней структуры, определяемой наличием встроенных Брэгговских отражателей [3].

Работа выполняется за счет средств государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе (тема FFUG-2025-0007).

Литература

- [1] В.Е. Anspaugh. GaAs Solar Cell Radiation Handbook. JPL Publication, 96-99 (1996).
- [2] G.P. Summers et al. Proceedings of 1994 IEEE 1st WCPEC, 2068-2075 vol.2 (1994).
- [3] М.З. Шварц и др. ФТП, **59(5)**, 291-293 (2025).

Обменное взаимодействие дырок с ионами марганца в двойной полумагнитной квантовой яме

М.И. Кузьменко

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Направление намагниченности ионов марганца, возникшей в магнитном поле в полумагнитной полупроводниковой квантовой яме (КЯ), можно изменить коротким (~ 1 пс) импульсом циркулярно-поляризованного света, направленного перпендикулярно магнитному полю.

Изменение направления намагниченности заключается в её повороте на угол ζ в эффективном магнитном поле, созданном спин-поляризованными фотовозбужденными дырками на ионах марганца за счёт их p - d обменного взаимодействия [1]. После окончания действия светового импульса отклонённая намагниченность ионов марганца прецессирует с ларморовой частотой вокруг внешнего магнитного поля, что приводит к осцилляциям магнитооптического эффекта Керра.

Мы измерили спектральную зависимость магнитооптического эффекта Керра в режиме накачка-зондирование с временным разрешением в узкой (8 нм) полумагнитной КЯ $\text{Cd}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{Te}$, отделённой от более широкой (20 нм) немагнитной ямы CdTe туннельным барьером $\text{Cd}_{0.88}\text{Mg}_{0.12}\text{Te}$ толщиной 1.6 нм. Амплитуда его осцилляций пропорциональна обменному полю ансамбля фотовозбуждённых дырок, усреднённого по пятну засветки, $\langle B_h \rangle = \beta n_h S_h P_h / (3g_{Mn} \mu_B)$, где P_h – вероятность нахождения дырки в полумагнитной яме, n_h – концентрация фотовозбуждённых дырок, β – константа обменного взаимодействия, $S_h = 3/2$ – спин дырки.

Мы разработали модель, в которой получили выражение для спектральной зависимости амплитуды осцилляций эффекта Керра в области экситонного резонанса в полумагнитной яме, включающее угол ζ в качестве параметра. Подгонка экспериментальной зависимости с помощью этого выражения позволила найти величину угла отклонения намагниченности ионов марганца $\zeta = 4.8 \cdot 10^{-4}$ рад и величину обменного поля дырки в области её локализации $B_h = 500$ Гс.

Работа выполнена в соавторстве с М.М. Афанасьевым, Б.Ф. Грибакиным, К.В. Кавокиным, Ю.Г. Кусраевым, В.К. Калевичем.

Литература

[1] J. Stühler et al. Phys. Rev. Lett. **74**, 2567 (1995).

Гетероструктуры с КТ InAs/InGaAs и сверхтонкими метаморфными буферными слоями $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$

О.Е. Лакунцова

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Один из возможных вариантов реализации источников одиночных фотонов, излучающих в телекоммуникационном С-диапазоне ($\lambda \approx 1.55$ мкм) длин волн связан с применением метаморфных эпитаксиальных гетероструктур (ГС) с квантовыми точками (КТ) InAs/InGaAs [1]. В данной работе ГС с метаморфными буферными слоями (МБС) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ с линейным и корневым («convex») профилем изменения состава по In ($x_{\min}=0.05-0.18$ до $x_{\max}=0.38-0.44$), выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), исследованы методами структурной характеристики. Для визуализации изменения содержания In по толщине МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ был использован метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и продемонстрировано хорошее соответствие измеренных и технологически заданных профилей. Процессы релаксации упругих напряжений в метаморфных ГС исследованы методом картирования обратного пространства в рентгеновской дифрактометрии для симметричного (004) и асимметричного (224) рефлексов. В частности, для ГС со сверхтонким МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($d_{\text{MBL}} \sim 0.22$ мкм, корневой профиль изменения состава) установлено, что релаксация напряжений частично происходит за счет наклона слоя (т.н. tilt). Из анализа изображений, полученных методом атомно-силовой микроскопии, установлена взаимосвязь между шероховатостью поверхности ГС с перекрестно-штриховой («cross-hatch») морфологией и условиями МПЭ роста градиентного и инверсного слоёв. Из анализа изображений метаморфных ГС, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в геометрии поперечного сечения, выполнена оценка плотности прорастающих дислокаций (ρ_{TD}) для ГС с различной конструкцией МБС. Установлено, что для структур со сверхтонким МБС величина $\rho_{\text{TD}} \sim 10^7 \text{ см}^{-2}$ превышает на порядок по величине значение ρ_{TD} для ГС с $d_{\text{MBL}}=0.6-1.1$ мкм, что согласуется с большей средней скоростью изменения состава по In в первом случае ($\sim 100\%$ In/мкм), при этом более плотный массив дислокаций несоответствия смещён в сторону подложки GaAs. Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной Карты «Квантовые Вычисления» (контракт № 868/1734-Д от 22.09.2025).

Литература

[1] S.V. Sorokin et al., JETP Lett. **121**, 35-40 (2025).

Смена знака циркулярной поляризации люминесценции в режиме оптической ориентации дырочных трионов и магнитополяронный эффект в квантовых ямах CdMnTe

Д.М. Ласкин

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Квантовые ямы (КЯ) на основе разбавленных магнитных полупроводников являются хорошими модельными объектами для исследования возможности контроля и управления спиновым состоянием частиц в полупроводниках. В таких системах в связи с s/p-d обменным взаимодействием наблюдается большое многообразие эффектов, среди которых эффект смены знака циркулярной поляризации фотолюминесценции (ФЛ) при резонансном циркулярно-поляризованном фотовозбуждении, наблюдающийся в КЯ $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($x < 4\%$) шириной 40 Å, содержащих резидентные дырки. Этот эффект описывается в работах [1,2] и объясняется наличием в КЯ резидентных дырочных магнитных поляронов (МП).

В продолжение исследований были измерены спектры поляризованной ФЛ в магнитном поле в геометрии Фойгта этих КЯ при резонансной циркулярно-поляризованной накачке трионных состояний, связанных с резидентными дырками в МП. Было обнаружено, что в магнитных полях до 1.3 Тл эффект смены знака циркулярной поляризации сохраняется, что может говорить о стабильности МП по отношению к внешнему магнитному полю. Также в спектрах ФЛ были обнаружены особенности, исчезающие при увеличении температуры и изменяющие свое спектральное положение в магнитном поле.

Автор благодарит коллег из лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Н.В. Козырева, Б.Р. Намозова и Ю.Г. Кусраева за помощь в постановке и проведении эксперимента, и за обсуждение результатов.

Литература

- [1] R.R. Akhmadullin et al. *J. Lumin.* **253**, 119431 (2023).
- [2] F. Godejohann et al. *PRB* **106**, 195305 (2022).

Оптимизация сильной связи в гибридной поляритонной системе Ag/WS₂/ННК GaP

М. В. Левичев

СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

Одной из проблем фотоники является низкая плотность интеграции функциональных элементов на чипе. Одним из путей ее решения является использование эффектов локализации электромагнитного поля за счет поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). С помощью плазмонных эффектов в гибридных структурах на основе монослоев дихалькогенидов переходных металлов (ДХПМ) при достижении режима сильной связи экситонов и ППП, возможна реализация наноразмерных источников когерентного излучения. В данной работе представлены результаты численного моделирования характеристик гибридной нанопотонной системы на основе серебряной подложки, слоя диэлектрика, ДХПМ и нитевидного нанокристалла (ННК) GaP. Оптимизация геометрии системы (диаметр ННК, толщина диэлектрика) производилась путем максимизации энергии Раби ($\hbar \Omega$) за счет увеличения перекрытия тангенциальных компонент поля гибридной ППП моды с монослоем ДХПМ (WS₂, WSe₂), а также за счет сохранения одномодового режима. Расчеты показали, что одномодовый режим достигается в диапазоне радиусов ННК от 27 до 46 нм для монослоя WS₂ и от 39 до 74 нм для WSe₂. При наличии диэлектрика в структуре, электрическое поле максимизируется под ННК в объеме диэлектрика, что снижает перекрытие с ДХПМ. При его отсутствии обеспечивается максимальное перекрытие монослоя ДХПМ с электрическим полем – интеграл перекрытия составляет ~2.3 % для WS₂ и ~1.3 % для WSe₂. Оптимальный радиус ННК для конфигурации без диэлектрика равен 45 нм (WS₂) и 74 нм (WSe₂). Дисперсионные кривые показали, что $\hbar \Omega \sim 1$ мэВ (WS₂), в то время как для WSe₂ расщепление не наблюдается. Таким образом, показано, что для достижения режима сильной связи в гибридной системе на основе монослоя WS₂, ННК GaP и серебряной подложки необходимо максимизировать перекрытие поля ППП моды с монослоем, обеспечить одномодовый режим, что позволяет достичь $\hbar \Omega \sim 1$ мэВ.

Выражаю благодарность А.Д. Большакову, А. Кузнецову и А.В. Налитову. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00135).

Литература

- [1] J. Fang, K. Yao, M. Wang, Z. Yu, T. Zhang, T. Jiang, S. Huang, B.A. Korgel, M. Terrones, A. Alù, Y. Zheng. *Nano Letters* **23(21)**, 9803-9810 (2023).

Верификация трубковой модели растекания тока и анализ карт электролюминесценции фотопреобразователей при помощи анализа трёхмерной распределённой эквивалентной схемы

А.Д. Малевская

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Растекание тока в структуре фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) является важным аспектом, который требует внимания при разработке и оптимизации данных устройств. Для описания процессов растекания тока наряду с аналитическими подходами, например, трубковой моделью растекания тока [1, 2], широко применяются численные методы, такие как метод многозвенных эквивалентных схем [3].

В данной работе для верификации трёхпараметрической трубковой модели используется численный метод для трёхмерной эквивалентной схемы ФЭП, что позволило достаточно точно формировать вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЭП, описывать растекание тока в структуре и моделировать карты электролюминесценции (ЭЛ) поверхности приборов. В работе проведено сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными на основе двух указанных подходов (численным методом и с использованием трубковой модели). Показана хорошая сходимость результатов для ВАХ и карт ЭЛ.

Сравнение результатов с трубковой моделью показало, что она не уступает в точности при описании ВАХ и позволяет качественно описывать карты ЭЛ. Существенным преимуществом трубковой модели является то, что она требует значительно меньших вычислительных ресурсов. Это преимущество оказывается ключевым при решении обратной задачи – определении резистивных параметров (сопротивление контактов, сопротивление слоев растекания и общее сопротивление структуры) ФЭП по картам ЭЛ и анализу ВАХ.

Литература

- [1] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров и др. ФТП **50**, 7 (2016).
- [2] А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, и др. ФТП **58(10)**, 573 (2024).
- [3] M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, et al. Prog. Photovolt: Res. Appl. **19(1)**, 73 (2011).

Сравнение характеристик полупроводниковых лазеров со ступенчатым р-волноводом

В.Н. Малец

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Проведено сравнительное исследование мощных многомодовых торцевых полупроводниковых лазеров ($\lambda \approx 1060$ нм) на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур (ГС) [1], выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Исследованы четыре дизайна: базовая ГС с расширенным волноводом и квантовой ямой (КЯ) (№1); с квази-градиентным р-волноводом (№2); со смещенными 2 КЯ к р-части (№3); с повышенным относительно предыдущей ГС содержанием Al в составе AlGaAs в эмиттерах и волноводе (№4).

Продемонстрировано, что модификация дизайна волновода позволяет повысить выходную мощность в непрерывном и импульсном режимах. Проводились измерения ватт-амперных характеристик (ВтАХ) лазерных диодов (ЛД) с различной длиной резонатора (2.0, 2.5 и 3.0 мм), без диэлектрических покрытий зеркал резонатора. Полученные ВтАХ различных ГС имеют одинаковый линейный начальный участок, что позволяет сделать вывод о технологической сопоставимости структур. На Рис. 1 представлены ВтАХ при импульсном режиме для ЛД при длине резонатора 2мм. Структура №4 демонстрирует максимальную выходную мощность, превышающую показатели базового дизайна №1 на 10 Вт. Наилучшие результаты (насыщение ВтАХ при более высоких токах накачки и меньшие внутренние потери) имеют структуры с квазиградиентным дизайном р-волновода и смещенными к р-эмиттеру двумя КЯ. В докладе будет представлено детальное сравнение параметров ЛД и теоретическое обоснование.

Автор благодарит научного руководителя и коллег лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей, заведующий лабораторией Н.А. Пихтин, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Литература

[1] С.О. Слипченко и др. КЭ 52,12 (2022).

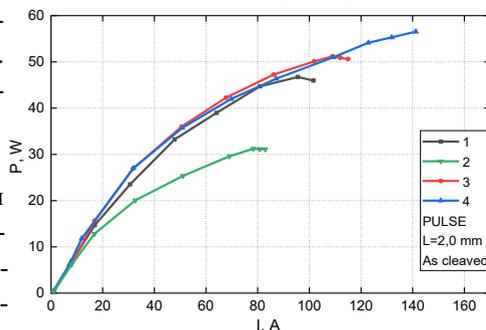


Рис. 1. ВтАХ ЛД в импульсном режиме

Резонансный туннельный эффект в акустическом волноводе

М.А. Миролубов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Туннельный эффект широко известен в физике полупроводников. Например, на его основе работает туннельный диод [1]. Ввиду множества аналогий между уравнениями квантовой механики, и волновыми уравнениями, становится возможным исследовать аналогичные эффекты тунnelирования в других областях физики [2]. В данной работе приведена экспериментальная демонстрация резонансного туннельного эффекта в одномерном акустическом волноводе переменного сечения. Одномерный акустический волновод состоял из трубы с жесткими стенками и размещенным внутри жестким кольцом с концентрическим отверстием. Исследовалась зависимость коэффициентов рассеяния от диаметра отверстия кольца и от частоты. Полученная частотная зависимость связана с резонансным прохождением через внутреннюю часть кольца.

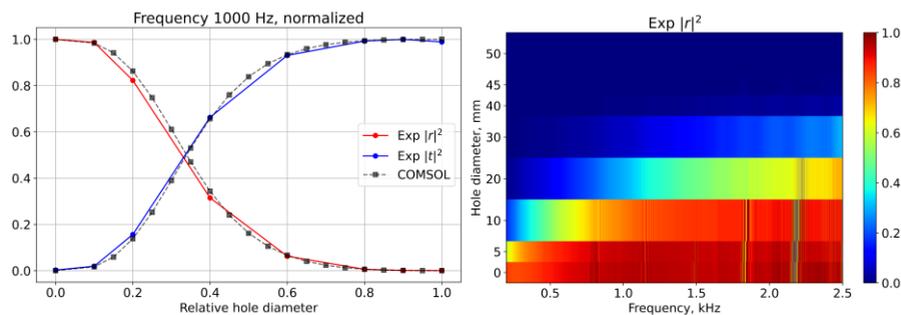


Рис. 1. Зависимость коэффициентов рассеяния в зависимости от диаметра отверстия диска (слева); зависимость коэффициента отражения от диаметра отверстия диска и от частоты (справа).

Литература

- [1] И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, Н.В. Коломейцева. ФТП, **39(9)**, 1138 (2005).
- [2] М.А. Миролубов, А.К. Самусев, И.Д. Тофтул, М.И. Петров. ПЖТЭФ **113(8)**, 553 (2021).

Электромагнитный отклик мультирезонансных метаматериалов на основе диоксида ванадия

Н.А. Миронов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

Диоксид ванадия (VO_2) с обратимым фазовым переходом «полупроводник—металл» характеризуется сильной зависимостью оптических свойств от фазового состояния [1], что делает его перспективным для сверхбыстрых устройств фотоники. Интеграция VO_2 с мультирезонансными метаматериалами перспективна для создания сверхбыстрых устройств фотоники благодаря возможности управлять коэффициентами отражения и пропускания в требуемом спектральном диапазоне [2,3].

В данной работе методами численного моделирования был исследован электромагнитный отклик гибридных резонаторов, состоящих из кремниевого цилиндра и диска VO_2 . Геометрия системы была оптимизирована для работы в ближнем ИК-диапазоне (40-100 ТГц) за счет резонансов Ми в кремнии и плазмонного резонанса в VO_2 . Переключение VO_2 из полупроводникового в металлическое состояния позволяет управлять эффективностью взаимодействия излучения с резонатором за счёт подавления магнитного дипольного резонанса — его интенсивность уменьшается примерно в 8 раз с преобладанием электро-дипольной составляющей в спектре рассеяния. При этом наблюдается спектральный сдвиг максимумов сечения рассеяния. Объединение гибридных резонаторов в периодический массив на кремниевой подложке позволяет подавить рассеяние назад и добиться высоких значений модуляции коэффициента отражения (максимальное изменение наблюдалось с менее чем 1 до 41 %). Полученные результаты перспективны для создания сверхбыстрых оптических систем обработки информации.

Автор благодарит А.Е. Гайдука за помощь при выполнении данной работы. Работа выполнена в рамках государственного задания FWGW-2025-0022.

Литература

- [1] C. Wan, et al. *Annalen der Physik*. **531**, 1900188 (2019).
- [2] P. Keric, et al. *ACS Photonics* **8**, 1048 (2021).
- [3] N.A. Mironov, A.E. Gayduk, S.V. Golod, 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in EDM, 240 (2024).

Исследование качества пассивации кремния в структурах $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$, полученных методом PE-ALD

В.А. Поздеев

СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Качественная пассивация является ключевым и необходимым условием для создания высокоэффективных солнечных элементов. Для осуществления атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 в качестве прекурсоров использовались триметилалюминий и закись азота (N_2O). Температура осаждения регулировалась при помощи нагревательного стола и составляла 150°C . Для активации N_2O на шаге окисления галлия использовалась емкостно-связанная ВЧ-плазма. Была проведена оптимизация параметров роста по количеству циклов, давлению N_2O и мощности ВЧ-плазмы. После роста проводился кумулятивный отжиг в атмосфере азота продолжительностью от 5 до 60 мин при температурах от 300 до 450°C . Качество пассивации структуры исследовалось методами спада фотолуминесценции (рис. 1а) и спектроскопии полной проводимости (рис. 1б).

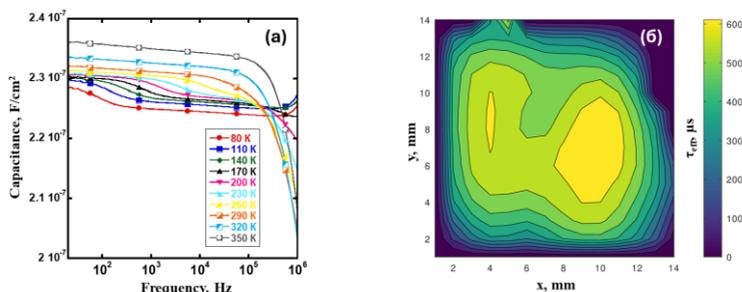


Рис. 1. Частотные зависимости емкости (а) структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p-Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и картограмма максимального эффективного времени жизни

При оптимизированном процессе роста с мощностью плазмы 20 Вт удалось получить время жизни носителей неосновных заряда 664 мкс, 432 мкс и 95 мкс на подложках p-Si, n-Si и n-Si с микроструктурированной поверхностью после отжига (20 мин, 350°C). Для емкостных исследований были сформированы МДП-структуры $\text{Au}/\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Обнаружено резкое падение плотности поверхностных состояний с $1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ до $3,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ на пластинах p-Si после отжига, что открывает возможности создания фотоэлектрических преобразователей на основе Al_2O_3 на подложках черного кремния p-типа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10275, <https://rscf.ru/project/24-79-10275/>).

Исследование ван-дер-ваальсовых гетероструктур на основе графена, MoTe_2 и WSe_2 методами сканирующей зондовой микроскопии

А.Д. Родиончикова

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Электронные свойства ван-дер-ваальсовых гетероструктур на основе графена и дихалькогенидов переходных металлов зависят от толщины слоёв и типа материала [1], что можно использовать в приборных структурах. В данной работе методами сканирующей зондовой микроскопии изучены поверхностный потенциал и работа выхода тонких слоёв MoTe_2 и WSe_2 , нанесённых на подложку графен/ SiC [2].

Установлено, что работа выхода обоих материалов изменяется с толщиной слоя на 40-50 мэВ. По мере увеличения толщины слоя это значение выходит на насыщение и стремится к работе выхода объёмного материала. Кроме того, обнаружено, что поверхностный потенциал деформированных областей MoTe_2 существенно отличается от потенциала недеформированных участков. Значение деформационного потенциала составляет ~40 мВ на 1% деформации. Полученные результаты были сравнены с данными DFT-расчёта, взятыми из литературы [3], которые полностью согласуются между собой.

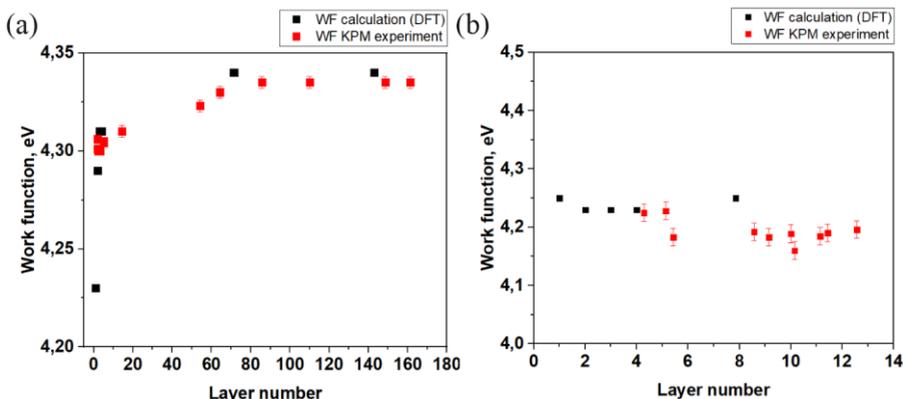


Рис. 1. Зависимость работы выхода (a) MoTe_2 и (b) WSe_2 от числа слоёв

Литература

- [1] B. Borodin, et al. Journal of Physics: Conference Series 081031 (2018).
- [2] A. Lebedev, et al. Semiconductors **52**, 1882-1885 (2018).
- [3] H. Kim, H.J. Choi. Physical review B **103**, 085404 (2021).

Омические контакты к субэлементам многопереходного GaInP/GaInAs/Ge фотопреобразователя

А.К. Романчук

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследован технологический подход по формированию дополнительных омических контактов к субэлементам многопереходного (МП) фотопреобразователя (ФП) солнечного излучения. Такой подход позволяет использовать каждый из субэлементов как отдельный фотоприемник, селективно настроенный на определенный диапазон длин волн излучения, и задавать рабочие режимы и исследовать характеристики субэлементов.

Экспериментальная часть работы выполнялась на трёхпереходной гетероструктуре GaInP/GaInAs/Ge. Для электрической коммутации к субэлементам прибора проведено селективное вытравливание слоев и формирование контактных площадок к высоколегированным слоям GaInAs и Ge субэлементов (рис.1). Исследованы режимы химического травления, включая анализ селективности используемых травителей. Разработаны оптимальные слои для контактных систем с низким омическим сопротивлением, что подтверждалось измерениями по модели линии передачи и вольтамперным характеристикам готовых приборов.

Характеристики ФП (спектральные и вольтамперные для отдельных субэлементов и полного прибора) показали эффективность примененных методов простростовой обработки. На готовых ФП реализуются методики оценивания эффективности люминесцентных взаимодействий между субэлементами, что имеет крайне важное значение для точного определения выходных фотоэлектрических характеристик МП ФП с оптически связанными субэлементами [1].

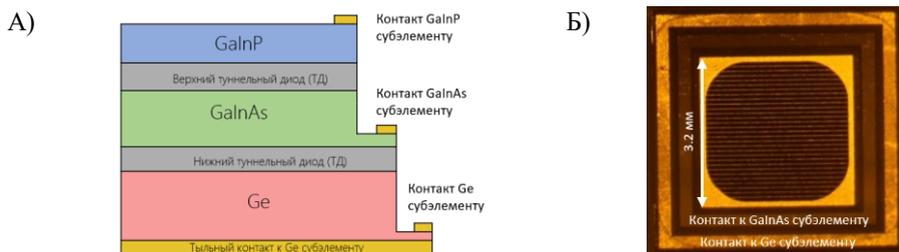


Рис.1. Контакты к слоям гетероструктуры (А) и вид лицевого рисунка МП ФП (Б)

Литература

[1] S.A. Levina, et.al. Sol. Energy Mater. Sol. Cells **213**, 110560 (2020).

Исследование катодолуминесцентных свойств кристаллов YAG:Nd, полученных методом флюса с использованием хлорида натрия

П.А. Сырников

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Иттрий-алюминиевые гранаты, активированные неодимом (YAG:Nd), широко применяются в качестве рабочих тел твердотельных лазеров, люминофоров и сцинтилляторов [1]. Поэтому разработка дешевых и простых с технологической точки зрения способов их получения и исследование того, как меняются при этом свойства материала, остаются актуальными задачами. В данной работе были получены и исследованы катодолуминесцентные свойства YAG:Nd, выращенного методом раствора в расплаве при 1000 °С с использованием в качестве флюса хлорида натрия. Образцы были исследованы методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и локальной катодолуминесценции (КЛ).

Установлено, что метод синтеза с использованием хлорида натрия (NaCl) в качестве флюса позволяет увеличить размер кристаллических зерен в несколько раз по сравнению с исходной шихтой (рис. 1а). Обнаружено, что получаемые кристаллы имеют яркое зеленое свечение. Однако распределение активатора по объему неоднородно. Большая часть зерен имеет оболочку с концентрацией Nd ~0.03-0.06 ат.%, в то время, как внутри зерна концентрация составляет порядка 0-0.02 ат.%. Получены и исследованы спектры КЛ (рис. 1б) для различных областей кристаллов, проведены сравнения с КЛ свойствами исходной шихты.

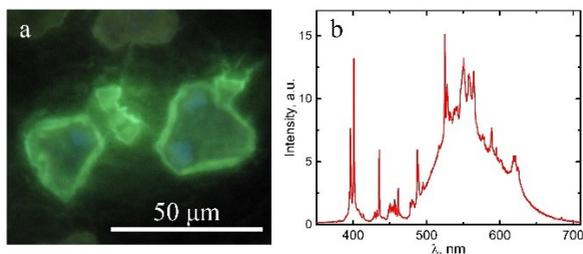


Рис. 1. КЛ изображение (а) и пример КЛ спектра (б) полученных YAG:Nd

Автор благодарит Хамитулина Н.Ю., Буракова Б.Е. за синтез образцов и Гусева Г.А., Заморянскую М.В. за помощь в исследованиях и руководство.

Литература

[1] S.A. Payne, G.F. Albrecht. Lasers, Solid-State. 2003.

Исследование направленного рассеяния на димере из лабиринтных акустических метаатомов

Ю.А. Тиманкова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Диэлектрики широко применяются в оптике, фотонике и оптоэлектронике для создания устройств, позволяющих манипулировать электромагнитными волнами. Эффекты, доступные для этих материалов, становятся также источником вдохновения для решения задач в других областях физики волновых явлений. Такое наблюдается, например, в аэроакустике, где в приближении линейной акустики может быть создан аналог диэлектрической частицы [1], поддерживающей эффект Керкера [2] и направленное рассеяние.

Ранее было показано экспериментальное достижение эффекта Керкера в акустике [3]. В данной работе продолжается исследование направленного рассеяния на частице-димере из лабиринтных метаатомов. Предложена геометрия частицы, у которой бианизотропный отклик приближается к максимальному как в моделировании, так и в эксперименте, а также показана возможность достижения асимметричного рассеяния на такой частице.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №25-79-31027.

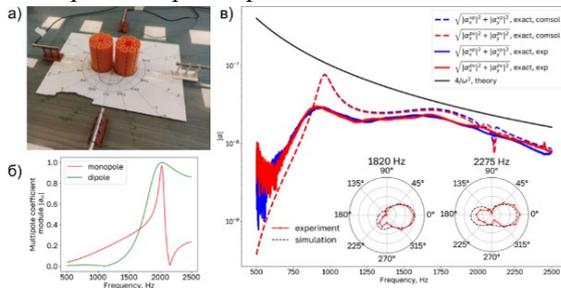


Рис. 1. а) Фотография экспериментального образца, б) мультипольный состав частиц в димере, в) бианизотропия частицы, выраженная через компоненты тензора поляризуемости и асимметричные диаграммы рассеяния

Литература

- [1] Y. Cheng, et al. Nature materials **14**(10), 1013 (2015).
- [2] H.-W. Wu, et al. Applied Physics Express **14**(9), 095501 (2021).
- [3] Ю.А. Тиманкова и др. ПЖТЭФ **123**(2), 149 (2026).

Электрические свойства гетероструктур GaPN(As)/Si

С.Н. Хруль¹, Е.В. Никитина^{1,2}

¹Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Были проведены исследования зависимости удельного контактного сопротивления ρ_c от температуры отжига для двух типов омических контактов к верхнему слою p -GaP:Ве толщиной 300 нм и уровнем легирования порядка 10^{19} см⁻³: Ni/Au (10/100 нм) и Ni/Ti/Au (10/10/100 нм). Для оценки ρ_c использовался метод СТЛМ (Circular Transmission Line Model) [1]. Измерения ВАХ проводились до и после отжига контактов в атмосфере N₂ при температурах 300-450°C с шагом 50 °C и длительностью 30 с. Для контакта Ni/Ti/Au наблюдалось увеличение ρ_c после отжига при температуре свыше 400°C, что может указывать на деградацию контакта, связанную с диффузией. При этом контакт Ni/Au был более устойчив к воздействию высоких температур. По результатам эксперимента был выбран контакт Ni/Au с минимальным ρ_c , равным $6.89 \cdot 10^{-3}$ Ом·см², после отжига при 400°C.

В данной работе представлены вольт-амперные характеристики трех p - i - n структур, выращенных методом МПЭ на подложках Si (001): 1) GaP_{0.98}N_{0.02} с толщиной i -слоя 300 нм; 2) GaP_{0.98}N_{0.02} с толщиной i -слоя 600 нм; 3) GaP_{0.88}N_{0.02}As_{0.1} с толщиной i -слоя 1200 нм (рис.1). В качестве нижнего контакта к кремниевой подложке n -типа использовался индий. Результаты показывают, что увеличение толщины i -GaPN слоя приводит к снижению тока короткого замыкания. Это может быть вызвано накоплением структурных дефектов из-за неточного согласования кристаллической решетки с кремниевой подложкой. Использование i -GaPNAs слоя увеличивает напряжение холостого хода, несмотря на меньшую ширину запрещенной зоны материала.

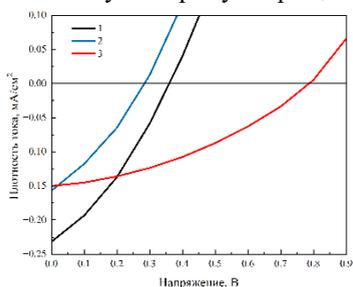


Рис. 1. ВАХ образцов при освещении

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00032.

Литература

[1] J.L. Gu et al., J. Alloy. Comp., 556 (2013), pp. 62-66

Влияние собственных и примесных дефектов на электронные и фононные свойства GeTe

М.Р. Шарнас

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Теллурид германия и твердые растворы на его основе являются одними из наиболее перспективных термоэлектриков для среднетемпературного диапазона с достаточно большим значением термоэлектрической эффективности около единицы [1]. Существенной особенностью GeTe является склонность к образованию большого числа собственных дефектов, в первую очередь вакансий германия, которые определяют р-тип проводимости и оказывают выраженное влияние как на фононные, так и на электронные свойства материала [2–5].

В данной работе на основе расчётов из первых принципов исследуется влияние вакансий германия и других собственных структурных дефектов, а также примесных дефектов замещения (Pb, Sn, Mn, Cd, I, Sb, In, Bi, Cu, Ag) на электронные свойства GeTe и фононные спектры.

DFT-расчёты для GeTe (R3m) позволили определить энергии образования дефектов и локальные структурные изменения. С использованием Easyunfold [6] проанализировано влияние дефектов на положение хипотенциала, структуру валентной зоны, ширину запрещённой зоны, появление дефектных уровней и изменение эффективных масс. Результаты работы планируется использовать в дальнейшем для исследования влияния точечных дефектов на транспортные свойства и термоэлектрическую эффективность материалов на основе GeTe.

Благодарность за помощь в исследовании выражается Д.А. Пшеннай-Северину (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-42-00053.

Литература

- [1] Л.В. Прокофьева, Ю.И. Равич, Д.А. Пшеннай-Северин и др. ФТП **46**, 889 (2012).
- [2] M. Hong, Y. Wang, W. Liu et al. Adv. Energy Mater. **8**, 1801837 (2018).
- [3] U.D. Wdowik, K. Parlinski, S. Rols, T. Chatterji. Phys. Rev. B **89**, 224306 (2014).
- [4] D. Campi, L. Paulatto, G. Fugallo et al. Phys. Rev. B **95**, 024311 (2017).
- [5] Д.А. Пшеннай-Северин, А.А. Шабалдин, П.П. Константинов, А.Т. Бурков ФТП **55**, 1144 (2021).
- [6] B. Zhu, S.R. Kavanagh et al. Journal of Open Source Software, **9(93)**, 5974 (2024).

Электрические свойства транзисторов на основе оксида индия олова (ITO), полученных методом импульсного лазерного осаждения (PLD)

И. Шмидт

МФТИ, Москва, Россия

ITO широко используется в качестве прозрачного полупроводникового материала для создания токопроводящих покрытий в электронных устройствах, и при определенных параметрах осаждения вместо низкоомного ITO можно получать высокоомные пленки, сопротивление которых сравнимо со стандартными полупроводниками [1, 2]. Это делает ITO многообещающим кандидатом для создания ультратонких транзисторов, что важно для достижения высокой степени интеграции микросхем.

В ходе исследования были определены оптимальные параметры PLD для получения высокоомного ITO. Осаждение проводилось в атмосфере кислорода с давлением 5 Па при комнатной температуре. Для напыления использовалась вторая гармоника (532 нм) Nd:YAG-лазера. В качестве электродов стока и истока использовался Ni, формирующий омический контакт с ITO. Наибольшая подвижность носителей, рассчитанная по передаточной характеристике, была зарегистрирована в пленке ITO толщиной 25 нм и составила $2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (рис. 1). С уменьшением толщины пленки пороговое напряжение транзистора увеличивается.

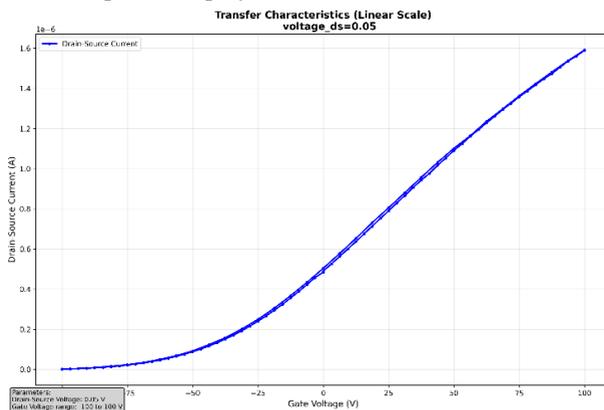


Рис. 1. Передаточная характеристика ITO транзистора при $V_{DS} = 0.05 \text{ В}$

Литература

- [1] Q. Li et al. Nature Communications **15**, 2686 (2024).
- [2] M. Si et al. IEEE Transactions on Electron Devices **68(7)**, 3195 (2021).

Моделирование образования дефектов, их реакций, и расчет уровня Ферми в гексагональном нитриде бора

И.И. Янибеков

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Точечные дефекты в широкозонных кристаллах, включая гексагональный нитрид бора (h-BN), рассматриваются как центры люминесценции и кандидаты на роль источников одиночных фотонов. Управляемое формирование дефектов возможно при локальном ионном облучении, однако, конечное распределение дефектов определяется не только процессами смещения, но и последующими рекомбинациями и реакциями между дефектами.

В данной работе выполнено моделирование облучения h-BN ионами гелия с использованием пакета IRADINA, в диапазоне доз облучения 10^{12} – $8.8 \cdot 10^{16}$ см⁻², что соответствует условиям ранее опубликованных экспериментов [1]. Расчёт вероятности реакций между дефектами выполнялся с использованием программного кода собственной разработки, в котором рассматривались реакции междоузлий и вакансий и рассчитывались их конечные концентрации после реакций, а также концентрации замещений, дивакансий и событий восстановления решетки. Далее решалось уравнение электронейтральности, связывающее заряды дефектов с концентрациями, полученными после их реакций, определялся уровень Ферми, а также устойчивые зарядовые состояния дефектов.

Полученные результаты показали, что при низких концентрациях смещенных (выбитых) атомов преобладают невзаимодействующие вакансии и междоузлия, тогда как при увеличении концентраций до 10^{-1} смещений на атом и выше возрастают вероятности восстановления решётки и образования антиструктурных дефектов. Уровень Ферми остаётся близким к середине запрещённой зоны, лишь незначительно изменяясь с ростом дозы и температуры. Зарядовый анализ показал, что устойчивым состоянием вакансии бора является -1 , вакансии азота $+1$, а для антиструктурного азота на месте бора - состояние $+1$, тогда как большинство других типов дефектов после рекомбинаций сохраняются в нейтральных состояниях.

Автор выражает благодарность научному руководителю Петрову Юрию Владимировичу. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №23-22-00067.

Литература

[1] Yu.V. Petrov, et al. Technical Physics, **68**, 7 (2023).

Внеконкурсная стендовая сессия

Внешне-локализованные электронные состояния в отрицательно заряженных одностенных углеродных нанотрубках

С.А. Вотяков

Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Существование состояний, локализованных в объеме полых углеродных наноструктур за счет наличия центрального кулоновского потенциала, показано как в фуллеренах, так и в одностенных углеродных нанотрубках (ОУН), и названы такие состояния SAMO и pseudo-SAMO соответственно [1,2]. Объемные состояния, в отличие от хорошо изученных поверхностно-локализованных состояний, являются метастабильными и обладают высоким временем жизни. За счет положительной зарядки глубина кулоновской потенциальной ямы в полых наноструктурах увеличивается, что приводит к увеличению водородоподобных состояний SAMO.

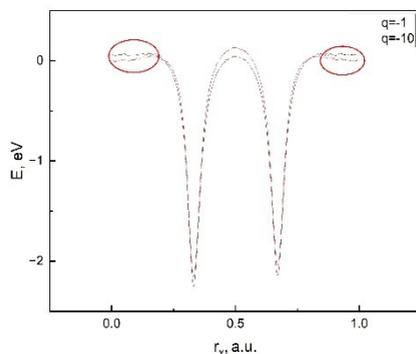


Рис. 1. Общий потенциал заряженной ОУН типа (10,0). Две глубокие потенциальные ямы на графике соответствуют стенкам нанотрубки. Внешне-локализованные состояния существуют в потенциальных ямах, глубина которых увеличивается с отрицательной зарядкой (выделены красным)

В данной работе для численного расчета ОУН используется теория функционала электронной плотности (DFT). Сообщается о существовании внешне локализованных электронных состояний с максимумом электронной волновой функции за пределами ОУН, которые как и состояния pseudo-SAMO являются водородоподобными.

При отрицательной зарядке полых наноструктур глубина центрального кулоновского потенциала уменьшается, при этом между двумя соседними нанотрубками образуется кулоновская потенциальная яма, глубина которой увеличивается при отрицательной зарядке. Существование внешне-локализованных метастабильных состояний начинается с заряда -6 для ОУН типа $(10,0)$. Такие состояния существуют с уровня НОМО.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-42-04003, https://rscf.ru/prjcard_int?24-42-04003).

Литература

- [1] J. Zhao, M. Feng, J. Yang, H. Petek. ACS Nano **3(4)**, 853 (2009).
- [2] A. Osadchy, V. Savin, L. Savina, V. Chaika. J. Optoelectron. Adv. Mater. **23(7–8)**, 327 (2021).

Поиск новых фаз при деформации полупроводников *in situ* с использованием прозрачного алмазного индентора-объектива

С.А. Вотяков

ИФВД РАН, Москва, Россия

Для того чтобы исследовать материалы в процессе поддержания постоянной нагрузки, предлагается использовать комбинированную систему спектроскопии комбинационного рассеяния, совмещенную с прозрачным алмазным индентором-объективом. Ключевой особенностью данного прибора является то, что индентор, представляющий собой две центрально симметричные пирамиды Берковича, повернутые относительно друг друга на 60° , выполняет двойную функцию: он прикладывает локальную силу и одновременно служит объективом для сбора сигнала комбинационного рассеяния света [1].

В данной работе представлена новая методика восстановления полной карты комбинационного рассеяния света из данных, собранных через трехсегментный прозрачный алмазный индентор-объектив для *in-situ* измерений во время приложения постоянной локальной нагрузки. Разработанная методика позволяет точно позиционировать сегменты путем их программной юстировки. Данная методика применена в исследовании фазовых переходов, в частности в монокристаллическом кремнии под постоянной нагрузкой для фиксации метастабильной металлической фазы. Используя шитые карты, можно локализовать и картировать пик, соответствующий металлическому фазовому переходу, обнаруженному в области под наконечником, причем зона проявления фазы простиралась за пределы расчетной площади отпечатка. Кроме

того, установлено, что интенсивность основного пика (520 см^{-1}) минимальна в области под отпечатком, что подтверждает металлизацию. Ключевой вклад работы заключается в демонстрации полной программно-аппаратной реализации *in situ* методики тестирования, преодолевающей инструментальные ограничения многосегментного сбора данных. Решенная проблема сшивки открывает перспективы для дальнейших точечных измерений.

В отличие от пика Si-I (520 см^{-1}), интенсивность которого минимальна в центральной точке по сравнению с периферийными областями, наблюдается четкое проявление моды в области $100\text{--}200 \text{ см}^{-1}$, что соответствует образованию металлической фазы Si-II. Это подтверждает переход в метастабильное состояние под давлением. Важно отметить, что данный пик уже не проявляется после снятия нагрузки по анализу остаточных отпечатков, что указывает на переход в кристаллическую фазу кремния, о чем также свидетельствует появление эффекта pop-out на кривой разгрузки.

Литература

[1] I. Maslenikov, V. Reshetov, A. Useinov, Instrum. Exp. Tech. **61**, 719 (2018).

Моделирование процесса индентирования медной пленки на кремниевой подложке с вариациями толщины пленки и радиуса сферического индентора

С.И. Вотякова

ИФВД РАН, Москва, Россия

Медь широко применяется в электронике как проводящий материал. Для исследования механических характеристик медных пленок перспективным методом является инструментальное индентирование со сферическими наконечниками. Однако при анализе пленок различной толщины интерпретация результатов осложняется выбором радиуса индентора и влиянием подложки [1, 2].

Цель работы – определить подходящий радиус сферического индентора для корректного измерения механических свойств медных пленок различной толщины на кремниевой подложке с использованием моделирования методом конечных элементов.

В COMSOL Multiphysics выполнено параметрическое численное исследование с вариациями радиуса сферического индентора (100, 200, 500, 1000 нм) и толщины пленки (100, 200, 500, 1000 нм). Анализ P–h диаграмм показал, что максимальная нагрузка при относительной глубине внедрения 10% от толщины пленки растет как

с увеличением ее толщины, так и с ростом радиуса индентора. Установлено, что для пленок 100 и 200 нм инденторы радиуса больше 100 нм приводят к завышению механических характеристик за счет влияния подложки, которое можно наблюдать через распространение напряжений по фон Мизесу за пределы пленки. Для пленок толщиной 500 и 1000 нм полностью исключают влияние подложки инденторы радиусом 100 и 200 нм, поскольку дают наиболее корректные оценки модуля Юнга, сопоставимые с табличными значениями меди ($\approx 110\text{--}130$ ГПа). Остальные инденторы (500, 1000 нм) не подходят для корректных измерений пленок в выбранном диапазоне толщин из-за эффекта подложки. Оптимальный выбор радиуса сферического индентора позволяет повысить достоверность измерений модуля Юнга, что важно при оценке надежности электронных устройств.

Литература

- [1] Ю.И. Головин. ФТТ **50**, 12 (2008).
- [2] A.S. Alaboodi, Z. Hussain. J. King Saud Univ. Eng. Sci. **31**, 1 (2019).

Метод резонансного подпространства для составных фотонно-кристаллических систем

Н.А. Гиппиус, И.М. Фрадкин, Н.С. Салахова, С.А. Дьяков
Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В докладе рассматривается метод построения резонансного приближения для матрицы рассеяния. На примере резонансных фотонных структур, допускающих разбиение на две нерезонансные подсистемы, продемонстрирована возможность построения регулярной аппроксимации положений резонансов составной системы. Все элементы резонансного представления определяются прямым расчётом в ограниченном числе точек пространства параметров и в дальнейшем допускают достаточно точную аппроксимацию в более широкой области параметров задачи. Предложенный метод позволяет конструктивно выделить резонансную часть матрицы рассеяния и построить регулярные схемы аппроксимации для расчёта оптических свойств фотонных структур, не требующих многочисленных и ресурсоёмких вычислений.

Рассматриваемые системы фотоники представляют собой слоистые структуры с периодической модуляцией диэлектрической проницаемости в плоскости слоёв и могут быть изготовлены с использованием хорошо развитых микро и нано технологий. Возможность управления дисперсионными свойствами этих структур за счёт модификации архитектуры элементарной ячейки открывает широкие возможности для применения этих систем в качестве базовых элементов фотоники.

Модальный метод Фурье (ФММ) (или метод матрицы рассеяния) является очень

эффективным инструментом для изучения оптических свойств многослойных вертикально-инвариантных периодических структур [1-6]. Однако для задач, требующих интегрирования по волновым векторам в плоскости структуры, необходимость многочисленных однотипных расчётов снижает эффективность этого метода. Рассматриваемый в докладе подход существенно расширяет возможности FMM.

Литература

- [1] S.G. Tikhodeev et al., Phys. Rev. B **66(4)**, 045102 (2002).
- [2] N.A. Gippius et al., Phys. Rev. B **72(4)**, 045138 (2005).
- [3] N.A. Gippius et al., Optics Express **18(7)**, 7569 (2010).
- [4] I.M. Fradkin et al., Phys. Rev. B **99(7)**, 075310 (2019).
- [5] S.A. Dyakov et al., Laser Photonics Rev. **15**, 2000242 (2021).
- [6] С.А. Дьяков et al., Письма в ЖЭТФ **122(10)**, 619 (2025).

Шум-ориентированный анализ характеристик биосенсоров на основе FET с гетероструктурой графен/MoS₂

Ф. Кераматирадмуса

Московский физико-технический институт, 141701, Москва, Россия

В данной работе представлен сравнительный анализ биосенсоров на основе полевых транзисторов (FET) с акцентом на шумовые характеристики, включая спектральную плотность мощности (PSD) и отношение сигнал/шум (SNR), для двумерных материалов: графена (G), MoS₂, а также их бислойных гетероструктур (M/G и G/M). Биосенсоры (FET) привлекают значительное внимание благодаря высокому отношению площади поверхности к объёму и сильной электростатической связи с заряженными биомолекулами. Однако низкочастотные шумы, в частности шум типа 1/f, обусловленные ловушками и флуктуациями заряда, остаются фундаментальным ограничением для надёжного обнаружения биомаркеров. Гетероструктуры графен/MoS₂ предоставляют возможность разделить чувствительность и шумовые характеристики за счёт электростатического экранирования и улучшенного транспорта носителей заряда. Отклик биосенсора моделировался посредством модуляции порогового напряжения, индуцированной поверхностным зарядом, для четырёх конфигураций канала: графен, MoS₂, M/G и G/M, с использованием физически обоснованных численных симуляций, реализованных на языке Python. Ключевые уравнения, использованные в анализе, включают:

Модуляция тока стока: $\Delta I_d = g_m \cdot \Delta V$, Отношение сигнал/шум (SNR):
 $SNR = \Delta I_d / I_{RMS}$.

Низкочастотный шум и спектральная плотность мощности (PSD): $SI(f) = \frac{A}{f}$.

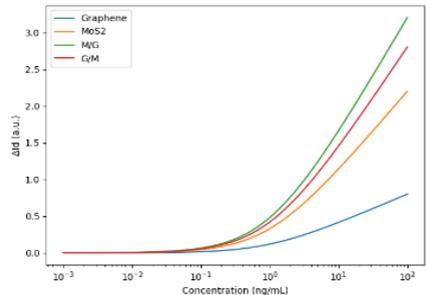


Рис. 1. Модуляция тока стока в зависимости от концентрации биомаркера

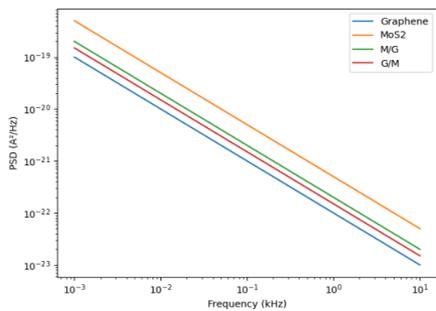


Рис. 2. Сравнение спектральной плотности мощности шума (PSD) (частота в кГц)

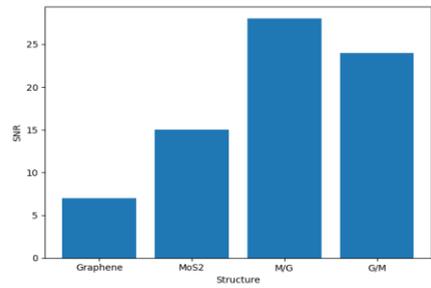


Рис. 3. Сравнительное отношение сигнал/шум (SNR) для различных конфигураций канала

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-42-10001.

Литература

[1] D. Sarkar, et al.. ACS Nano **8(4)**, 3992 (2014).
 [2] G. Xu, et al.. IEEE Sensors Journal (2020).
 [3] V.K. Sangwan, M.C. Hersam. Annual Review of Physical Chemistry (2018).

Нагрев порошков SiO_2 в СВЧ поле на частоте 8,9 ГГц

В.Г. Пахомова, А.О. Шохрина, А.М. Воротынов, Д.А. Великанов,
М.Н. Волочаев, С.В. Столяр
ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

Аморфные, диамагнитные порошки SiO_2 диаметром d от 100 до 1000 нм были получены методом Штобера [1]. Морфология и размеры порошков были определены с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ). Элементный состав порошка определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Рентгенофазовый анализ проводили на приборе DX-2700ВН. Измерения статических магнитных свойств частиц проводились на вибрационном магнитометре LakeShore VSM 8604. Нагрев порошков проводили в резонаторе ЭПР спектрометра SE/X-2544 (Radiopan) на частоте 8.9 ГГц. Для измерения температуры использовали термопару Т-типа. На рисунке 1(а) приведено характерное ТЕМ изображение изготовленных порошков. На рисунке 1(б) приведена характерная гистограмма распределения по размеру. На рисунке 1(в) приведены кинетические кривые нагрева $T(t)$ порошков с разными размерами в СВЧ поле. Оказалось, что температура нагрева изготовленных порошков немонотонно зависит от их размера. Возможно, зависимость $\Delta T_{\text{макс}}(d)$ связана с размерным «резонансным» эффектом изучаемых порошков – возбуждением упругих стоячих волн в частицах изготовленных порошков.

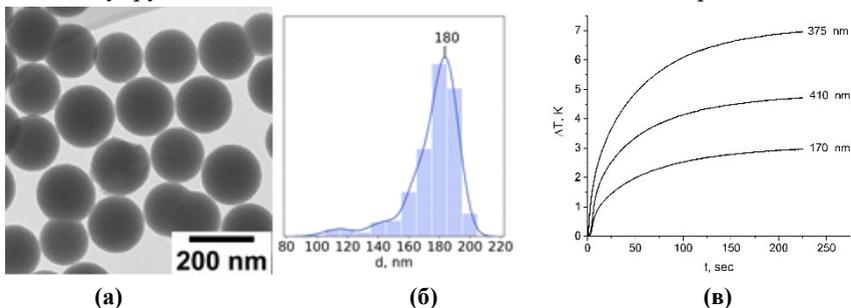


Рис. 1. Характерная микрофотография (а) и гистограмма распределения по размерам (б). Кинетические кривые нагрева $\Delta T(t)$ порошков SiO_2 разных размеров (в)

Исследование выполнено за счет средств госзадания ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

[1] E.B. Werner Stober, Arthur Fink. J. Phys. Ther. Sci. 26, 62 (1968).

Моделирование экситон-экситонного обменного взаимодействия в широкой GaAs/AlGaAs квантовой яме в электрическом поле

Шимин Чжэн, Е.С. Храмцов, И.В. Игнатьев
СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Для моделирования обменного взаимодействия использовался формализм, развитый в работе [1]. Вычислены матричные элементы констант обменного взаимодействия двух экситонов в квантовых ямах (КЯ) GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As различной ширины с использованием волновых функций основного состояния тяжелого экситона (Xhh1), полученных ранее [2]. Обменное взаимодействие рассчитано в КЯ шириной 30, 50 и 100 нм в электрическом поле от 0 до 6 кВ/см при различных значениях переданного импульса q . Расчёт матричных элементов проводился с помощью интегрирования методом Монте-Карло с использованием графических процессоров.

Полученные зависимости константы обменного взаимодействия J_{X-X}^{exch} от электрического поля F и переданного импульса q представлены на рис. 1. При $q \ll \dots$, J_{X-X}^{exch} растёт от отрицательных значений с увеличением F . Здесь a_B — боровский радиус экситона. В КЯ ≥ 50 нм константа становится положительной (отталкивание экситонов), что особенно выражено в 100-нм КЯ. При $q \gg \dots$, J_{X-X}^{exch} стремится к нулю. Это поведение J_{X-X}^{exch} обсуждается в докладе.

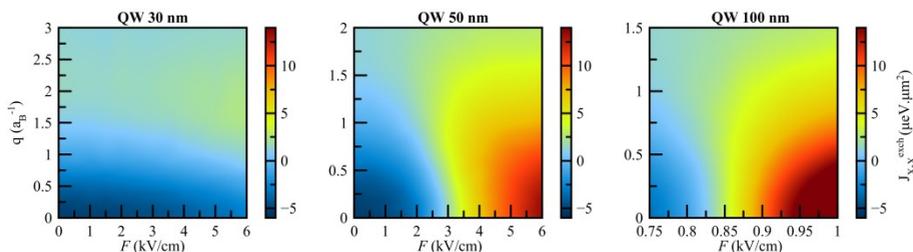


Рис. 1. Цветовая карта зависимости константы экситон-экситонного обменного взаимодействия, J_{X-X}^{exch} , от электрического поля F и переданного импульса q

Авторы благодарят проект СПбГУ № 125022803069-4. Шимин Чжэн благодарит China Scholarship Council.

Литература

- [1] B.F. Gribakin, E.S. Khramtsov, A.V. Trifonov et al. Phys. Rev. B **104**, 205302 (2021).
- [2] Shiming Zheng, E.S. Khramtsov, I.V. Ignatiev. Physica E **174**, 116333 (2025).

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Молодежная конференция
по физике полупроводников
«Зимняя школа 2026»

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)
25 февраля – 1 марта 2026 года