

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

Международная зимняя школа по физике полупроводников

2020

Научная программа и тезисы докладов

С.-Петербург – Зеленогорск
27 февраля – 2 марта 2020 года

Организатор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Соорганизатор «Гелиос-отель»

Программный комитет

П.С. Копьев (*председатель*)

Е.Л. Ивченко

Р.А. Сурис

В.И. Козуб

О.М. Сресели

А.Ю. Маслов

С.А. Тарасенко

Е.В. Куницына

П.А. Дементьев

П.А. Алексеев

Организационный комитет

А.Г. Забродский (*председатель*)

Р.В. Парфеньев (*зам. председателя*)

Л.Ф. Гребеновская

Е.В. Куницына

П.А. Дементьев

Е.В. Иванова

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований
проект № 20-02-20024

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
ООО «ИоффеЛЕД»

Техническая поддержка

ООО «АНДЕРС»

Четверг, 27 февраля	5
<i>А.М. Красильщиков</i>	14:40–15:25
Экзопланеты: долгожданные находки или разочарования?	5
<i>А.В. Иванчик</i>	15:30–16:15
Физическая космология	6
<i>В.В. Жданов</i>	16:20–17:05
Литий-ионные аккумуляторы	6
<i>А.Г. Забродский</i>	17:30–18:15
Создание наземной солнечной энергетики Российской Федерации	7
<i>И.Л. Дричко</i>	18:20–19:05
Исследование электронного транспорта в полупроводниковых материалах и структурах акустическими и микроволновыми методами	10
Пятница, 28 февраля	14
<i>Е.Л. Ивченко</i>	09:30–10:15
Интерфейсные эффекты в полупроводниковых гетероструктурах	14
<i>А.С. Мельников</i>	10:20–11:05
Эффект близости в системе сверхпроводник–полупроводник	15
<i>П.С. Копьев</i>	15:00–15:45
Лекция к 90-летию Ж.И. Алферова	21
<i>В.М. Устинов</i>	15:50–16:35
Развитие научных исследований в Академическом университете и НТИЦ Микроэлектроники РАН — научно-образовательном и прикладном проектах академика Ж.И. Алферова	22
<i>Ю.П. Яковлев</i>	17:00–17:45
Фотоприемники на основе узкозонных полупроводников $A^{III}B^V$ для экологии и медицины	23

<i>М.З. Шварц</i>	17:50–18:35	
Гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи солнечного излучения		24
Суббота, 29 февраля		25
<i>А.А. Фраерман</i>	09:30–10:15	
Магнитокалорический эффект и проблема магнитного охлаждения		26
<i>М.В. Ви</i>	10:20–11:05	
Gauge-invariant microscopic kinetic theory of superconductivity . .		26
<i>Д.Р. Яковлев</i>	15:00–15:45	
Спиновые явления в коллоидных полупроводниковых нанокристаллах		27
<i>И.В. Андреев</i>	15:50–16:35	
Новые плазменные возбуждения в двумерных электронных системах		28
<i>А.А. Федянин</i>	17:10–17:55	
Нелинейная оптика диэлектрических наноантенн и метаповерхностей		30
<i>П.А. Дементьев</i>	18:00–18:45	
Диагностика гетероструктур. Современные подходы		31
Воскресенье, 1 марта		32
<i>М.Н. Попова</i>	09:30–10:15	
Кристаллы для квантовой памяти		32
<i>Н.А. Поклонский</i>	10:20–11:05	
Электродиффузия границы полупроводник–водяной пар		33

Экзопланеты: долгожданные находки или разочарования?

А.М. Красильщиков

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

Представлен обзор современных наблюдательных данных об экзопланетах, полученных за четверть века, прошедшие с момента открытия в 1995 году «горячего юпитера» 51 Peg b, которое в 2019 году было отмечено Нобелевской премией по физике. Рассмотрены основные техники регистрации экзопланет и сравнительные характеристики как специализированных, так и многопрофильных телескопов, используемых для поиска таких объектов. Данные наблюдений сопоставлены с предсказаниями теории эволюции и динамики планетных систем. Кратко изложена история открытия в 1992 году двух первых экзопланет у пульсара B1257+12, планеты 51 Peg b, а также первых в истории прямых наблюдений планеты Фомальгаут b, выполненных с помощью орбитального телескопа им. Хаббла. Обсуждаются перспективы исследований экзопланет с такими новыми инструментами как CHEOPS, JWST и ELT, в частности, проблемы регистрации биомаркеров.

Проект РФФИ № 16-29-13009 «Комплементарные исследования источников гамма-всплесков и компактных звезд: моделирование и всеволновые наблюдения».

Литература

- [1] A. Wolszczan, *Science*, **264**, 538, 1994.
- [2] M. Mayor, D. Queloz, *Nature*, **378**, 355, 1995.
- [3] R. Claudi *Exoplanets: possible biosignatures*, Proceedings of science, 2017, arXiv:1708.05829, 2017.
- [4] David H. DeVorkin, Robert W. Smith, *The Hubble Cosmos: 25 Years of New Vistas in Space*, National Geographic Society, 2015.
- [5] C. Scharf *The Copernicus Complex: Our Cosmic Significance in a Universe of Planets and Probabilities*, Farrar, Straus and Giroux, 2014.
- [6] L. Kaltenegger *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **55**, 433, 2017.

Физическая космология

А.В. Иванчик

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

Первая часть нобелевской премии 2019 г. присуждена Джеймсу Пиблсу за существенный вклад в понимание строения и эволюции Вселенной. Развитие наблюдательной и теоретической космологии привело не только к лучшему определению значений многих космологических параметров, но и позволило определить некоторые из них с процентной точностью, что, в свою очередь, позволило говорить об эре «прецизионной космологии». В докладе обсуждаются успехи прецизионной космологии и ее нерешенные, а так же вновь возникшие проблемы.

Грант РФФИ 18-52-15021

Литий-ионные аккумуляторы

В.В. Жданов

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

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), в качестве перезаряжаемых химических источников тока, нашли широкое применение в портативной электронике, в электромобилях, в сетевой и возобновляемой энергетике, в спецтехнике [1]. Большой вклад в создание аккумуляторов данного типа внесли, проводимые в 1970х–1980х годах работы Джона Гуденафа (John Goodenough), Стенли Уиттингема (Stanley Whittingham) и Акира Йошины (Akira Yoshino), получивших Нобелевскую премию по химии в 2019 г. Первыми разработку и постановку на производство ЛИА осуществили японские компании Sony и Asahi Kasei в 1991 году. В настоящее время объем мирового рынка ЛИА превышает 30 млрд долларов.

Основными компонентами любого химического источника тока являются электроды — катод и анод, разделенные электролитом, содержащим подвижные ионы и не проводящим электроны. Принцип работы химического источника тока заключается в протекании электрохимических реакций на электродах, за счет чего создается разность потенциалов и происходит преобразование энергии химического процесса в электрическую энергию. В случае аккумулятора электродные реакции являются обратимыми, что позволяет ис-

пользовать его многократно. В ЛИА в качестве электродных реакций происходит обратимое внедрение (интеркаляция) ионов лития — переносчиков заряда в структуру матрицы хозяина, которым является активная составляющая материала электрода [2]. Активный электродный материал ЛИА должен обладать определёнными характеристиками: высокой электронной и ионной проводимостью по ионам Li^+ ; способностью к обратимой интеркаляции большого количества ионов Li^+ ; структурной устойчивостью при обратимой интеркаляции ионов Li^+ ; в случае катодного материала — высоким химическим потенциалом κLi^+ для обеспечения максимального напряжения аккумулятора.

Технические характеристики, стоимость, безопасность существенно зависят от типа активных материалов и электролитов, используемых в технологии ЛИА [3,4].

В лекции будут рассмотрены принципы работы ЛИА, характеристики применяемых активных материалов и электролитов, основные типы и характеристики аккумуляторов, принципы построения высоковольтных батарей, вопросы безопасности при их эксплуатации. Показаны перспективы повышения энергетических характеристик, срока службы, расширение температурного диапазона работоспособности, обеспечения безопасности ЛИА за счет разработки новых материалов.

Литература

- [1] C. Pillot. *Current Status and Future Trends of the Global Li-ion Battery Market*. July 4th 2018, London, p. 28.
- [2] G.-A. Nazri., G. Pistoia. *Lithium Batteries: Science and Technology* / USA: Kluwer Academic Publishers, 2003. 706 p.
- [3] M. Yoshio, R.J. Brodd, A. Kozawa. *Lithium-Ion Batteries*. Science and Technologies Springer Science+Business Media, LLC 2009, 460 p.
- [4] Hsueh-lung Lu. *Future trends and key issues in the global lithium-ion batteries market and related technologies*. CIBF 22 May 2018.

Создание наземной солнечной энергетики Российской Федерации

А.Г. Забродский

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

В 1930 году в мире произошел прорыв в области технологий фотоэлементов, в качестве которых стали использоваться работающие на воздухе пластинки закиси меди. Их к.п.д. под влиянием запросов техники быстро довели

до 0.1%. Это, большое, по тем временам, достижение вдохновило А.Ф. Иоффе выступить с программой «солнечных крыш», как реального будущего человечества. И уже через несколько лет под его руководством в ФТИ был создан солнечный элемент из сернистого таллия с к.п.д. около 1%. Однако, первое значимое для человечества применение солнечных батареи получили, начиная с 60-х годов XX века, в связи с их использованием на космических аппаратах. На низких орбитах использовались кремниевые фотопреобразователи, а на удаленных — более радиационноустойчивые и эффективные преобразователи на основе гетероструктурполупроводников A^3B^5 . Лидером их отечественных разработок явился коллектив ученых и технологов из ФТИ под руководством Ж.И. Алферова и В.М. Андреева.

Начало XXI века ознаменовалось бурным развитием в мире наземной кремниевой солнечной энергетики, мощности которой достигли к 2018 г. 400 ГВт (около 10% мощности всех электростанций мира). Россия катастрофически отставала, и чтобы преодолеть это, в 2009 г. было выпущено Распоряжение Правительства «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года». В 2010 мы в ФТИ на основе достижений лаборатории В.М. Андреева подготовили масштабный проект по строительству завода по производству солнечных модулей для концентраторной фотовольтаики на основе трехпереходных гетероструктур A^3B^5 на Ge с объемом инвестиций более 5 млрд рублей, который был принят Роснано, однако, не смог быть реализован в связи с несостоятельностью выбранного им инвестора.

В том же 2010 году ГК Ренова — один из крупнейших в мире производителей оборудования для энергетики и Роснано приняли решение о создании крупномасштабного производства солнечных модулей по тонкопленочной кремниевой технологии — завода Хевел в г. Новочебоксарске и специализированных производств по строительству солнечных электростанций и автономных энергокомплексов в регионах РФ с участием ФТИ. Предполагалось в качестве базовой использовать популярную тогда в мире тонкопленочную микроморфную структуру: аморфный кремний на микрокристаллическом кремнии (a-Si/c-Si). Несмотря на невысокий к.п.д. (около 10%), она привлекала малым расходом дорогого в то время сырья — кремния.

Было принято решение о создании Научно-технического центра (НТЦ) при ФТИ, перед которым ставилась задача развития тонкопленочных технологий для строящегося в г. Новочебоксарске завода Хевел. Так сформировался научно-технологический консорциум: ФТИ, НТЦ, Хевел и Авелар Солар Технолоджи (последний — для проектирования строительства солнечных

электростанций и автономных энергокомплексов). На ФТИ также возлагалась задача подготовки на своей базовой кафедре в СПбГЭТУ квалифицированных кадров для завода Хевел.

Первые годы работа Консорциума проходила согласно разработанному плану: удалось поднять к.п.д. тонкопленочных солнечных модулей с 8.5 до 11.7%, снизить скорость их деградации, подготовить необходимые заводу кадры, наладить промышленный выпуск модулей, строительство из них солнечных электростанций и энергокомплексов. Однако, тонкопленочную кремниевую солнечную энергетику мира постигла драматическая развязка, связанная с обрушением Китая в 20 раз мировых цен на поликремний. Тонкопленочные модули быстро потеряли конкурентоспособность по сравнению с хотя и существенно более кремнеёмкими, но, при этом, вдвое более эффективными кремниевыми модулями на основе аморфно-кристаллических гетероструктур (a-Si:H/c-Si). По всему миру заводы, работавшие по тонкопленочной технологии, закрылись.

Россия, однако, смогла избежать этой участи. Меньше, чем за 2 года, удалось разработать новую промышленную технологию высокоэффективных гетероструктурных кремниевых фотоэлектрических преобразователей и солнечных модулей на основе гетероструктура-Si:H/c-Si, адаптированную к основному оборудованию завода Хевел. В конце 2016 – начале 2017 года завод Хевел прошел модернизацию и освоил выпуск модулей по новой технологии с КПД до 23%. Это позволило удвоить его годовую мощность, доведя ее до 173 МВт/год, чем обеспечить успешную реализацию госпрограммы развития солнечной энергетики в РФ с доведением мощности солнечных энергоустановок до 1.5 ГВт к 2024 году. Россия начала экспортировать свои высокоэффективные модули. Уже к началу 2018 г., благодаря реализации проекта, в стране было введено 174 МВт мощностей солнечных энергоустановок. Возникла новая подотрасль энергетики РФ — наземная солнечная энергетика.

Помимо строительства сетевых солнечных электростанций в ближайшие годы планируется создание более 100 автономных гибридных солнечно-дизельных энергоустановок в отдаленных районах страны. Это обеспечит повышение надежности энергоснабжения удаленных потребителей, улучшение социальных условий, создаст предпосылки создания экономически эффективной энергетической инфраструктуры для освоения территорий опережающего развития РФ: Арктика, Дальний Восток и др.

Исследование электронного транспорта в полупроводниковых материалах и структурах акустическими и микроволновыми методами

И.Л. Дричко

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

В докладе представлен цикл работ по исследованию электронного переноса в различных полупроводниковых материалах (от 3-х мерных кристаллов к 2-мерным системам с квантовыми ямами и 0-мерными системами с квантовыми точками) бесконтактными методами, акустическими и микроволновыми. В первом случае изучается поглощение и изменение скорости распространения объемных или поверхностных акустических волн, обусловленные электронами изучаемого материала или структуры. Во втором — исследуется затухание электромагнитных мод специальным образом сформированного волновода, вблизи которого расположен образец. Оба метода не требуют формирования электрических контактов, свойства которых могли бы повлиять на результаты экспериментов и их интерпретацию. При этом, как правило, электромагнитные измерения производятся на более высоких частотах, чем акустические, и соответствующие области частот не перекрываются. Нам, однако, удалось добиться перекрытия соответствующих диапазонов и таким образом впервые количественно изучить комплексную высокочастотную проводимость в широком частотном диапазоне.

Акустические исследования объемных образцов

Акустические исследования полупроводниковых материалов были стимулированы теоретическими работами D.L. White [*J. Appl. Phys.* **33**, 2547 (1962)] и В.Л. Гуревича [*Sov. Phys.-Sol. State* **4**, 668 (1962)], посвященными исследованию взаимодействия ультразвуковых волн с электронами в пьезоэлектрических полупроводниках. В этих работах было показано, что поглощение звука в них определяется параметрами электронной системы. Это открыло дорогу акустическим методам изучения полупроводников. Кроме того, было показано, что при приложении электрического поля к кристаллу при определенных условиях можно получить эффект усиления звуковой волны почти на 60 дБ.

Наши исследования полупроводников акустической методикой начались в 60-х годах на трехмерных кристаллах n -InSb. Нам удалось одними из первых в мире получить на этом материале усиление до 50 дБ звука с частотой от 100 до 800 МГц, а также исследовать влияние магнитного поля на его

поглощение [1].

Большой цикл наших работ посвящен исследованию компенсированного n -InSb, основные результаты которых изложены в обзоре [2]. В этих работах исследованы зависимости высокочастотной ВЧ прыжковой проводимости, осуществляющейся в этих материалах при низких температурах, от частоты, магнитного поля и степени компенсации. Показано, что механизмы проводимости для свободных (зонных) электронов, определенные с использованием постоянного тока, а также акустической методики, одинаковы. В то же время, механизмы прыжковой проводимости существенно различаются. В наших работах предложена процедура разделения вкладов свободных и локализованных электронов в полную проводимость материала.

Исследования образцов с 2-мерной проводимостью

Особенно полезными и важными оказались акустические исследования в объектах с квантовыми ямами, с 2-мерной проводимостью. Именно такими системами мы занимались в последние годы. В частности, мы исследовали акустические свойства структур с квантовыми ямами n -AlGaAs/GaAs/AlGaAs, p -Si/SiGe/Si, p -SiGe/Ge/SiGe. Для этого мы использовали т.н. гибридную конфигурацию, когда поверхностная акустическая волна (ПАВ) возбуждается в пьезо-диэлектрике LiNbO₃, а образец прижимается пружиной к этой поверхности. Расчет электрических полей в такой системе сделан, например, в работе [3]. Важно, что при этом переменная деформация, созданная ПАВ, в образце не передается. Это дает возможность непосредственно определять ВЧ проводимость в проводящем канале. Кроме того, в качестве измеряемого объекта мы можем работать с материалами, не являющимися пьезоэлектриками (такими, как образцы на основе Ge и Si). В результате, мы разработали новую методику определения ВЧ проводимости проводящего слоя в этих структурах и ряда его параметров (концентрации носителей, подвижности, квантового и транспортного времен релаксации и др.) [4,5].

Акустическая методика оказалась особенно информативной в условиях осуществления квантового эффекта Холла. Дело в том, что в режиме целочисленного квантового эффекта Холла наблюдаются глубокие осцилляции высокочастотной проводимости в зависимости от магнитного поля. Впервые в этом режиме нами наблюдались и интерпретировались осцилляции ВЧ проводимости, связанные со спиновым расщеплением зон Ландау [6]. В минимумах осцилляций обычно носители заряда локализованы, а акустические измерения очень полезны при изучении характера локализации. А именно, при одновременном измерении поглощения и изменения скорости ПАВ в зависимости от магнитного поля можно определять комплексную высокочастотную ВЧ проводимость $\sigma^{h.f} = \sigma_1 - \sigma_2$. Было впервые экспериментально показано, что для

делокализованных (зонных) носителей заряда $\sigma^{hf} = \sigma_1 = \sigma^{DC}$, т.е. $\sigma_1 \gg \sigma_2$, а для локализованных носителей $\sigma_2 > \sigma_1$ [7].

Результаты экспериментальной зависимости поглощения и изменения скорости ПАВ от реальной компоненты проводимости в нелегированных структурах n -GaAs/AlGaAs при освещении инфракрасным светом опубликованы в работе [8].

Наиболее интересный результат, полученный в структурах p -Si/GeSi/Si с квантовой ямой SiGe, связан с тем, что зависимость от частоты величин, а также и знак компонентов ВЧ проводимости дает возможность определять характер локализации носителей заряда. Действительно, если носители тока локализуются в минимумах случайного потенциала и $\sigma_2 > \sigma_1$, а σ_2 имеет положительный знак, то при низких температурах осуществляется ВЧ-прыжковая проводимость по локализованным состояниям. Однако в работе [9] в экстремальном квантовом пределе при факторе заполнения $\nu < 1$ ($B > 14$ Тл, $T < 0.8$ К) наблюдался переход от локализации в случайном потенциале примесей к вигнеровскому стеклу, для которого проводимость характеризуется изменением знака σ_2 на отрицательный.

При исследовании квантовых ям Ge в структурах p -GeSi/Ge/GeSi наряду со стандартными задачами по изучению механизмов проводимости в этом материале мы в работе [10] использовали новую для нас микроволновую методику, позволившую нам увеличить максимальную частоту измерений с 300 до 1200 МГц. Особенность этой методики состоит в том, что из измерений микроволнового поглощения сложно количественно определить проводимость изучаемой системы, тогда как нам было необходимо «сшить» проводимость, определяемую из акустических измерений с проводимостью на высокой частоте. Для этого мы предложили оригинальную процедуру, позволившую количественно определять частотную зависимость проводимости в системах с квантовым эффектом Холла в широком диапазоне частот. В работе [11] с ее помощью измерена прыжковая ВЧ проводимость, реализуемая в минимумах осцилляций в режиме квантового эффекта Холла в диапазоне частот 30–1200 МГц. Наблюдавшуюся частотную зависимость проводимости σ_1 удалось объяснить на основе модели, предполагающей прыжки носителей заряда между локализованными состояниями, принадлежащими изолированным кластерам. При больших частотах доминирующие кластеры являются парами близких состояний (2-х узельная модель), при уменьшении частоты становятся важными большие кластеры, которые при стремлении частоты к нулю сливаются в бесконечный перколяционный кластер. Таким образом, частотные зависимости ВЧ проводимости в широком диапазоне частот могут быть представлены одной универсальной кривой.

Серия работ выполнена на структурах n -AlGaAs/GaAs/AlGaAs с высокой подвижностью. Высокая подвижность носителей в проводящем канале структур позволяет наблюдать осцилляции проводимости в магнитных полях при факторе заполнения $\nu \leq 1$, соответствующих дробному эффекту Холла. В работе [12] в окрестности $\nu = 1/5$, а также в области $0.18 > \nu > 0.125$ при $T < 200$ мК и $B = 12 - 18$ Тл на основании частотных и температурных зависимостей проводимости наблюдалось диэлектрическое состояние, связанное с образованием вигнеровского кристалла, запиннированного дефектами (стекла).

Исследования образцов с 0-мерной проводимостью (с квантовыми точками)

Серия работ посвящена исследованию образцов с квантовыми точками Ge и Ge_{0.7}Si_{0.3} в Si. В работе [13] на основе измеренных акустоэлектронных эффектов подробно рассмотрены механизмы проводимости в системе с квантовыми точками Ge_{0.7}Si_{0.3} при низких температурах $T = (1 - 20)$ К и магнитных полях до 18 Тл. Показано, что механизм проводимости является смешанным: это прыжковая проводимость между локализованными в квантовых точках состояниями и активационной диффузионной проводимостью на уровне протекания. Эти вклады удалось разделить, что позволило проанализировать температурную зависимость прыжковой проводимости в нулевом магнитном поле. Характер этой зависимости дал возможность определить время перезаселения уровней при прыжковой проводимости.

Заключение

В представленном докладе мы продемонстрировали информативность бесконтактных ВЧ методов (акустического и микроволнового) для анализа механизмов электронного переноса в различных полупроводниковых материалах и низкоразмерных структурах на их основе. Приведены результаты экспериментальных исследований, часть которых невозможно осуществить другими методами исследования транспорта. Экспериментальные результаты проанализированы на основе существующих и специально разработанных теорий, представленных в этом цикле работ. В работе принимали участие А.М. Дьяконов, И.Ю. Смирнов, А.В. Суслов, Ю.М. Гальперин.

На разных этапах выполнения работы была получена поддержка грантов РФФИ № 95-02-04066а, № 98-02-18280а, № 98-02-18280а, № 04-02-16246а, № 14-02-00232а, № 14-02-00232а, № 04-02-16246а, и № 03-02-16526а.

Литература

- [1] И.Л. Дричко, Ю.В. Илисавский, Ю.М. Гальперин, *ФТТ*, **11**, 2463 (1969).
- [2] Ю.М. Гальперин, Е.М. Гершензон, И.Л. Дричко, и др., *ФТП*, **24**, 3 (1990).

- [3] A.L. Efros, Y.M. Galperin, *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 1959 (1990).
- [4] И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, А.М. Крещук, и др., *ФТП* **31**, 451 (1997),
- [5] И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов, *ФТП*, **31**, 1092 (1997).
- [6] И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, В.В. Преображенский, и др., *ФТП*, **33**, 979 (1999).
- [7] I.L. Drichko, A.M. Diakonov, I.Yu. Smirnov, *et al*, *Phys. Rev. B* **62**, 7470 (2000).
- [8] И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, И.Ю. Смирнов, и др., *ФТП*, **40**, 1449 (2006).
- [9] I.L. Drichko, A.M. Dyakonov, I.Yu. Smirnov, *et al*, *Phys. Rev. B* **77**, 085327 (2008).
- [10] I.L. Drichko, A.M. Diakonov, V.A. Malysh, *et al*, *J. Appl. Phys.* **116**, 154309 (2014).
- [11] И.Л. Дричко, А.А. Дмитриев, В.А. Малыш, и др., *ЖЭТФ* **153**, 294 (2018).
- [12] I. L. Drichko, I.Yu. Smirnov, *et al*, *Solid State Commun.* **213-214**, 46 (2015).
- [13] И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, И.Ю. Смирнов, и др. *ЖЭТФ* **128**, 1279 (2005).

Интерфейсные эффекты в полупроводниковых гетероструктурах

Е.Л. Ивченко

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

Главным элементом любых полупроводниковых наноструктур (квантовых ям, квантовых нитей, квантовых точек) является интерфейс: без границ раздела не бывает и наноструктур, а кроме того, влияние интерфейсов растет по мере уменьшения размерности. Несовершенства интерфейса ограничивают многие важнейшие параметры наноструктур, такие, например, как подвижность свободных носителей и квантовый выход люминесценции. Помимо несовершенств на границах раздела, которые в принципе устранимы, большое влияние на параметры наносистем может оказывать и сама атомарная структура идеальных интерфейсов. Лекция посвящена проявлению этой принципиально неустраняемой микроструктуры интерфейса. План лекции и ее краткое содержание приведены ниже.

- Зонная структура объемных полупроводников с решеткой цинковой обманки. Валентная зона Γ_8 , гамильтониан Латтинжера.
- Стандартные граничные условия Бастарда. Общий вид граничных условий для волновой функции электрона в простой зоне.
- Граничные условия в случае сложной валентной зоны Γ_8 . Смешивание состояний тяжелой и легкой дырки на интерфейсе (001). Проявление анизотропии химических связей на интерфейсе.
- Эффекты интерфейсного смешивания состояний тяжелой и легкой дырки.

1. Экситоны в сверхрешетке GaAs/AlAs типа II. Тонкая структура экситонов, наличие в одной и той же гетероструктуре двух экситонных состояний с

равными по модулю, но противоположными по знаку значениями анизотропного обменного расщепления.

2. Гетероструктуры без общих катиона и аниона типа I (InGaAs/InP) и типа II (ZnSe/BeTe, InAs/AlSb, InAs/GaSb). Гигантская линейная поляризация излучения экситонов в структурах типа II (до 80% и выше): в структурах с неэквивалентными нормальным и инвертированным интерфейсами эта оптическая анизотропия наблюдается без приложения внешних сил, а при эквивалентных интерфейсах она наводится электрическим полем (гигантский квантово-размерный эффект Поக்கельса).

3. Интерфейсный вклад в спиновое расщепление электронных и дырочных дисперсионных ветвей в структурах с квантовыми ямами. В гетероструктуре Si/SiGe это расщепление имеет чисто интерфейсную природу. Описание спин-орбитального расщепления дырочных энергетических ветвей в многозонной модели.

4. Энергетический спектр свободных носителей в структурах с квантовой ямой HgTe/CdHgTe. При определенной (критической) толщине d_c слоя квантовой ямы запрещенная зона в структуре исчезает, а зависимость энергии от квазиимпульса в окрестности точки $\mathbf{k} = 0$ становится линейной. В простой $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ модели состояния в этом дираковском конусе двукратно вырождены. Учет анизотропии интерфейсных химических связей приводит к снятию этого вырождения и раздвоению дираковского конуса.

5. Наведенная интерфейсная оптическая анизотропия.

Литература

- [1] E.L. Ivchenko, A.Yu. Kaminski, U. Rössler, *Phys. Rev. B* **54**, 5852 (1996).
- [2] A.V. Platonov, V.P. Kochereshko, E.L. Ivchenko, *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3546 (1999).
- [3] A.A. Toropov, E.L. Ivchenko, O. Krebs, *et al*, *Phys. Rev. B* **63**, 035302 (2000).
- [4] M.V. Durnev, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, *Phys. Rev. B* **89**, 075430 (2014).
- [5] S.A. Tarasenko, M.V. Durnev, M.O. Nestoklon, *et al*, *Phys. Rev. B* **89**, 075430 (2014).
- [6] Y.H. Chen, X.L. Ye, B. Xu, and Z.G. Wang, *J. Appl. Phys.* **99**, 096102 (2006).

Эффект близости в системе сверхпроводник–полупроводник

А.С. Мельников

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave, 354340, Sochi, Russia

Лекция посвящена физике сверхпроводящих состояний, индуцированных в низкоразмерных полупроводниковых системах за счет эффекта близости.

Планируется рассмотреть индуцированные сверхпроводящие состояния как в одномерных, так и в двумерных системах с существенным спин-орбитальным взаимодействием на основе, например, полупроводниковых проводов, топологических изоляторов с краевыми или поверхностными модами, а также тонкопленочных многослойных структур. Характерной особенностью рассматриваемых задач будет учет влияния спинового расщепления, возникающего, например, за счет эффекта Зеемана при приложении внешнего магнитного поля. Особое внимание будет уделено топологическому переходу в системе, происходящему при изменении магнитного поля или химического потенциала и сопровождаемого появлением низкоэнергетических состояний квазичастиц майорановского типа.

Планируется, в частности, обсудить следующие задачи: (1) влияние геометрии и, в частности, кривизны полупроводниковых проводов на особенности индуцированных в них анизотропных сверхпроводящих корреляций и локализованных состояний квазичастиц; возможность создания джозефсоновских фи-контактов на основе подобных структур [1]; (2) вихревые состояния в системах с индуцированной сверхпроводимостью и, в частности, в полупроводниковых проводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой [2]; (3) динамика подщелевых состояний квазичастиц (включая состояния майорановского типа) [3]; (4) обратный эффект близости в топологически нетривиальных состояниях систем с индуцированной сверхпроводимостью [4]; (5) коллективные моды Хиггса в гибридных системах с эффектом близости (появление новых типов мод с частотами, определяющимися как исходной энергетической щелью сверхпроводника, так и индуцированной щелью в спектре возбуждений гибридной системы) [5]. Все полученные теоретические результаты будут обсуждены в контексте современных экспериментов.

1. Применение майорановских систем к квантовым вычислениям, квантовой информации и квантовой памяти требует построения сетей сложных конфигураций. Это обстоятельство, в свою очередь, поднимает важный вопрос о зависящих от геометрии эффектах (например, изгиб провода, повороты, соединения или образование петель) в физике индуцированной сверхпроводимости. Последствия изгиба нанопроволоки должны иметь особое значение для систем с индуцированным сверхпроводящим порядком и комбинированными эффектами спин-орбитальной связи и магнитного поля в топологически нетривиальной сверхпроводящей фазе. Нами были изучены геометрические эффекты, характерные для топологически нетривиальных сверхпроводящих состояний. Исходя из теории Боголюбова-де-Жена, описывающей индуцированную сверхпроводимость p -типа в майорановском проводе произвольной формы, предсказаны несколько интригующих явлений, таких как зависящая от

геометрии фазовая батарея (или джозефсоновский ϕ -переход со спонтанной сверхпроводящей разностью фаз) и генерация дополнительных квазичастичных мод на уровне Ферми, пространственное положение которых определяется направлением внешнего магнитного поля. Подобная "тонкая"настройка может быть использована для расширения возможностей запутывания состояний в майорановских сетях.

2. Изучение особенностей вихревого состояния в полупроводниковых проводах с наведенной сверхпроводимостью в настоящее время представляет большой интерес в связи с перспективой использования таких гибридных структур для реализации майорановских состояний и последующего устройства топологически защищенных квантовых вычислений на основе майорановских состояний. Одной из сложностей экспериментальной реализации топологической сверхпроводимости в гибридных структурах с эффектом близости, состоящих из сверхпроводника и полупроводника с сильным спин-орбитальным взаимодействием является достаточно большое значение приложенного магнитного поля (~ 1 Т), обеспечивающее необходимое для топологического перехода зеемановское расщепление. Такое зеемановское поле может быть, вообще говоря, сравнимо с критическим магнитным полем разрушения сверхпроводимости. В ряде недавних теоретических работ были предложены варианты гибридных структур, для которых данное ограничение не существенно. В частности, было показано, что в полностью покрытых сверхпроводником полупроводниковых проводах, находящихся во внешнем магнитном поле H , направленном вдоль оси провода, входящие при сравнительно слабых магнитных полях (~ 0.1 Т) вихри могут перевести систему в топологическую фазу. Основным требованием существования топологической фазы в подобных гибридных структурах является наличие в полупроводниковом коре достаточно сильного спин-орбитального взаимодействия Рашбы с радиальным вектором нормали. Для объяснения недавних экспериментов по наблюдению майорановских мод в сверхпроводящей оболочке, полностью покрывающей полупроводниковый нанопровод, был выполнен расчет поперечной структуры электронных мод, учитывающий как нормальное, так и андреевское отражение. Хорошо известно, что в том случае, если преобладает андреевское отражение, электронная структура вихревого состояния определяется известным выражением для спектра Кароли-де Жена-Матрикона, а наличие доли нормального отражения приводит к осцилляциям положения подщелевых уровней энергии. На основе уравнений Боголюбова-де Жена были вычислены зависимости спектра возбуждений полупроводниковых проводов, полностью покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой, от приложенного магнитного поля, направленного вдоль оси провода, и параметров провода. При расчетах учиты-

валось как нормальное отражение на границе полупроводник/сверхпроводник из-за скачка материальных параметров (эффективных масс и энергий Ферми), так и андреевское отражение на границе полупроводник/сверхпроводник. На основе выполненных расчетов были получены зависимости электронной плотности состояний и щели в спектре возбуждений для данной гибридной структуры от приложенного магнитного поля. В работе показано, что наличие обедненной области в центре полупроводникового кора может приводить к нетривиальной зависимости величины щели в спектре возбуждений от магнитного поля: при входе в гибридную структуру вихря щель в спектре квазичастиц сначала исчезает, а потом вновь открывается при дальнейшем увеличении магнитного поля.

3. С целью количественного выяснения особенностей динамики майорановских состояний нами рассмотрена задача о стационарном и нестационарном зарядовом транспорте через следующую систему: p -волновой сверхпроводящий провод, концы которого находятся в туннельной связи с нормальными резервуарами. Как напряжение на нормальных электродах, так и высоты туннельных барьеров могут меняться во времени, что позволяет на основе решения данной задачи предлагать постановки экспериментальных задач, направленных на измерение характерных времен динамики майорановских состояний. Нами получены динамические уравнения для квантовомеханических амплитуд связанных майорановских состояний на концах провода. С использованием этих уравнений решены 2 задачи. (a) Вычисление тока через систему при синусоидальном изменении высот барьеров на границах с электродами в присутствии заданного потенциала между резервуарами. При этом барьеры открываются и закрываются с некоторым сдвигом фаз, что может быть вполне реализовано с помощью системы затворов с нестационарными потенциалами в структурах с полупроводниковыми проводами с наведенной сверхпроводимостью. При низких частотах изменения высоты барьеров, сдвиг фаз между гармоническими зависимостями высот левого и правого барьеров оказывает существенное влияние на транспортный ток, что указывает на очевидное обстоятельство: на низких частотах биения волновой функции между концами провода обеспечивают корреляции отклика квазичастиц. На частотах же превышающих частоты биений, зависимость от указанной разницы фаз пропадает, что конечно означает невозможность распространения квазичастиц между концами провода за времена, меньшие характерного времени туннелирования между андреевскими квантовыми ямами. (b) Вычисление импульсов тока в системе с импульсным открытием барьеров в присутствии заданного потенциала между резервуарами. Это по сути — реализация эксперимента типа *shot-probe* для майорановских состояний. Аналогично предыдущему случаю

нами была обнаружена существенная осциллирующая зависимость величины импульсов тока от времени задержки между импульсами потенциалов затворов, открывающих барьеры между резервуарами и сверхпроводящим проводом. Таким образом, нами предсказан новый режим в динамике майорановских состояний - режим биений на частоте, соответствующей расщеплению по энергии в системе связанных майорановских состояний. На основе рассмотренных задач нами предложены простые постановки экспериментов, которые могут определить времена динамики майорановских состояний и представить экспериментальное свидетельство относительно возможности или невозможности передачи сигнала между майорановскими состояниями за исчезающе малые времена (т.е. явления квантовой телепортации), которые обсуждаются в литературе.

4. Исследован обратный эффект близости в полупроводниковых проводах с большим g -фактором, сильным спин-орбитальным взаимодействием и индуцированной сверхпроводимостью (S). Мотивацией для этой работы стали как известные ранее экспериментальные работы показывающие осциллирующую зависимость критической температуры сверхпроводника от толщины контактирующего с ним полупроводникового слоя, так и теоретические предсказания существенной модификации профиля сверхпроводящего параметра порядка вблизи точечной магнитной примеси. В последнем случае расчеты показывают, что вблизи магнитной примеси образуется атомарной толщины слой параметра порядка с инвертированной сверхпроводящей фазой. Таким образом, полупроводниковая подсистема даже с малым числом транспортных каналов может оказать существенное обратное влияние на сверхпроводник. Такое влияние может быть вполне существенно в плане формирования индуцированной сверхпроводимости, которая определяется характеристиками сверхпроводника на границе раздела. В рамках теории Горькова нами получена зависимость критической температуры сверхпроводящей оболочки от параметров провода — уровня химического потенциала, величины зеемановского расщепления и энергии спин-орбитального взаимодействия. Показано, что наличие сильного парамагнитного эффекта для электронов, туннелирующих в провод, а также особенностей Ван Хофа в электронной плотности состояний в проводе могут приводить к подавлению сверхпроводящих корреляций в области слабых магнитных полей и к возвратной сверхпроводимости при сильных магнитных полях в топологически нетривиальной фазе. Подавление однородного сверхпроводящего состояния вблизи границы между топологически тривиальным и нетривиальным режимами обеспечивает условия, благоприятные для неустойчивости Ларкина–Овчинникова–Фульде–Феррелла.

5. Моды Хиггса в сверхпроводниках могут быть интерпретированы как ко-

герентный процесс расщепления и восстановления куперовских пар. Разница энергий между основным состоянием без квазичастиц и возбужденным состоянием с парой квазичастиц в сверхпроводнике составляет удвоенную величину щели, поскольку каждая квазичастица имеет энергию порядка сверхпроводящей щели. Данная энергия и определяет частоту осциллирующей когерентной суперпозиции основного и возбужденного состояний, а частоты мод Хиггса определяются квазичастичным спектром системы. В SIN структуре сверхпроводящие корреляции, проникающие в нормальный металл, приводят к появлению наведенной жесткой щели в спектре квазичастиц всей системы. Величина такой наведенной щели зависит от прозрачности туннельного барьера и толщины нормальной подсистемы. Как и в изолированном сверхпроводнике, пара может когерентно расщепиться на два электрона, а энергия неспаренных электронов определяет частоту этого процесса. В присутствии нормального металла когерентное расщепление и восстановление куперовских пар может сопровождаться туннелированием одного или двух электронов в нормальный металл. Минимальная энергия для каждого электрона, туннелирующего в нормальный металл, равна величине индуцированной щели. Следовательно, в SIN системах возникают две дополнительные моды Хиггса, соответствующих туннелированию одного или двух электронов в нормальный металл. Частоты мод Хиггса, отвечающих таким процессам, равны сумме индуцированной и основной щелей или удвоенной индуцированной щели, для случая одного или двух электронов, туннелирующих в нормальный металл при распаде куперовской пары. При малой прозрачности барьера на границе металла и сверхпроводника, амплитуды этих мод пропорциональны, соответственно, фактору прозрачности, либо его квадрату. Поскольку индуцированная жесткая щель в спектре всей системы ниже, чем энергия квазичастиц в сверхпроводнике, когерентная суперпозиция может быть разрушена некогерентным туннелированием электрона из сверхпроводника в нормальный металл. Этот эффект приводит к экспоненциальному затуханию мод Хиггса со скоростью, обратно пропорциональной характерному времени жизни электрона в сверхпроводнике. Моды Хиггса в гибридных SIN системах могут быть изучены с помощью терагерцевых pump-probe методик и измерения резонансной генерации третьей гармоники.

Работы поддержаны проектом РНФ 17-12-01383 (задачи 3 и 4) и проектами РФФИ 17-52-12044, 18-02-00390 и 19-31-51019 (задачи 1,5,2).

Литература

- [1] A. G. Kutlin and A.S. Mel'nikov, Geometry-dependent effects in Majorana nanowires, *Phys. Rev. B* accepted.
- [2] N.B. Kopnin, *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 027003 (2013); A.A. Kopašov and A.S. Mel'nikov, unpublished.
- [3] I.M. Khaymovich, *et al*, *New J. Phys.* **19**, 123026 (2017).
- [4] A.A. Kopašov, *et al*, *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018, **9**, 1184–1193; doi:10.3762/bjnano.9.109.
- [5] V.L. Vadimov, *et al*, *Phys. Rev. B*, **100**, 104515 (2019).

Лекция к 90-летию Ж.И. Алфéroва

П.С. Копьев

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

В лекции рассказывается о становлении и развитии в ФТИ им. А.Ф. Иоффе научной школы академика Ж.И. Алфéroва по физике и технологии пролуэпроводниковых гетероструктур.



Рис. 1. Академик РАН, лауреат Нобелевской премии, Ж.И. Алферов (1930–2019)

Развитие научных исследований в Академическом университете и НТЦ Микроэлектроники РАН — научно-образовательном и прикладном проектах академика Ж.И. Алферова

В.М. Устинов

НТЦ Микроэлектроники РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия

Академический университет был создан академиком Ж.И. Алферовым, основателем новой модели подготовки научной смены: начиная со старшей школы и заканчивая аспирантурой. Вуз имеет статус национального исследовательского университета. Его научная и образовательная деятельность направлена на развитие высокотехнологичных отраслей экономики Российской Федерации и подготовку кадров в этой сфере; приоритетные направления — нанoeлектроника, нанoфотоника, возобновляемые источники энергии и нанобиосистемы. Главная задача Академического университета — интеграция науки и образования в области физики и биоинформационных технологий. Научная база университета достигла результатов мирового уровня в области физики и технологии полупроводниковых наноструктур и нанобиотехнологий. За последние годы значительно выросло число студентов и аспирантов, непосредственно участвующих в научной работе и даже ведущих собственные проекты.

Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук был создан в 1991 г. с целью проведения исследований и разработок в области полупроводниковых оптоэлектронных приборов на базе многокомпонентных эпитаксиальных гетероструктур. Научная деятельность НТЦ микроэлектроники РАН лежит в области исследований методов эпитаксиального выращивания и диагностики полупроводниковых наногетероструктур, изучения физических основ работы приборов на основе наногетероструктур, а также включает разработку новых типов опто- и микроэлектронных приборов и последующее продвижения их в промышленность. В настоящее время НТЦ микроэлектроники РАН ведет исследования по следующим направлениям:

- физика и технология твердотельных наноструктур
- физика и технология элементной базы микро- и нанoeлектроники
- разработка и создание научно-технологического оборудования для

микро- и нанoeлектроники

- экспериментальная техника, новые методы в технологии, технике, медицине и экологии, в том числе с использованием элементной базы микро- и нанoeлектроники.

Фотоприемники на основе узкозонных полупроводников $A^{III}B^V$ для экологии и медицины

Ю.П. Яковлев

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

В докладе будут приведены результаты пионерских исследований сотрудников лаборатории ИК оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе по разработке, созданию, исследованию и применению быстродействующих фотодиодов, в том числе лавинных фотодиодов с низким уровнем избыточных шумов, на основе узкозонных полупроводников InAs, GaSb и их твердых растворов, работающих при комнатной температуре в спектральном диапазоне 1.6 – 4.9 мкм. Такие фотодиоды широко применяются в диодно-лазерной спектроскопии, в оптоэлектронных сенсорах для мониторинга окружающей среды, медицинской диагностики человека и биологических объектов. Кроме того, они находят применение в аппаратуре специального назначения для высокоскоростной связи по открытому каналу в первом окне прозрачности атмосферы, лазерной дальнометрии и локации, наведения и визуализации объектов в средней ИК области спектра.

План доклада

1. Мотивация работы
2. «Матери и отцы» создатели полупроводников $A^{III}B^V$
3. Основные параметры p-i-n фотодиодов
4. Полупроводниковые материалы для фотодиодов
5. P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.5–2.4 мкм
6. P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5–3.8 мкм
7. P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5–4.9 мкм
8. Повышение квантовой эффективности фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5–4.9 мкм
9. Основные параметры лавинных фотодиодов

10. «Резонансная» ударная ионизация дырками в узкозонных полупроводниках на основе InAs и GaSb
11. Лавинные фотодиоды (ЛФД) для спектрального диапазона 1.5–2.4 мкм
12. Шумовые характеристики ЛФД на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb
13. Сверхбыстродействующие p-i-n фотодиоды на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.6–2.4 мкм
14. Применение p-i-n фотодиодов
15. Заключение.

Работа в части создания фотодиодов для регистрации излучения WGM-лазеров поддержана грантом РФФИ № 18-52-00027 Бел-а.

Гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи солнечного излучения

М.З. Шварц

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

На сегодняшний день фотоэлектрические преобразователи на A^3B^5 гетероструктурах являются абсолютными «рекордсменами» среди полупроводниковых приборов по эффективности реализации процессов прямого перевода лучистой энергии в электричество. Преобразователи с широкой спектральной чувствительностью (многоступенчатые или каскадные солнечные элементы) используются в космических солнечных батареях и наземных фотоэлектрических модулях с концентраторами излучения, а специализированные узкополосные приемники-преобразователи составляют основу систем с энергетической подпиткой мощным лазерным излучением. В докладе представлен обзор современных архитектур и технологий высокоэффективных солнечных элементов и преобразователей лазерного излучения, рассмотрены последние достижения и перспективы по основным направлениям исследований и совершенствования конструкций, технологий и материалов, представлен уровень отечественных разработок. Показаны приборы с рекордными показателями по эффективности преобразования солнечного (космического — 35.8%, наземного — 38.8% и сконцентрированного — 47.1%) и лазерного (60 и 50% для длин волн 809 и 1064 нм) излучений. Обозначены практически значимые рубежи по КПД преобразования космического и наземного солнечного излучения в 40 и 50%, соответственно.

Гранты РФФИ

Завершенные проекты

14-08-01222 Люминесцентная связь между субэлементами в монокристаллических многослойных гетероструктурах: ее природа, механизмы и потенциальные возможности для повышения эффективности (кпд) солнечных элементов

14-08-00720 Фотоэлектрические преобразователи мощного узкополосного излучения

16-29-03216 Метаморфные наногетероструктуры со встроенными сверхрешетками для фотоэлектрических преобразователей излучений широкого спектрального диапазона

16-08-00742 Разработка и исследование высокоэффективных фотопреобразователей лазерного излучения, созданных на основе АЗВ5 метаморфных гетероструктур

17-08-00247 Фотоэлектрические модули с концентраторами излучения из термопластичных материалов и с солнечными элементами АЗВ5

Выполняемые проекты

19-08-00881 Метаморфные эпитаксиальные InGaAs гетероструктуры для высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей различного назначения

Новые проекты

20-38-70070 Температурная динамика оптических и электрических параметров фотопреобразователей на основе АЗВ5 многослойных квантоворазмерных структур и фотонных кристаллов

20-08-00602 Оптика для концентрирования солнечного излучения: рациональные схемные и физико-технические решения

Литература

- [1] *Handbook on Concentrator Photovoltaic Technology*, ed. by C. Algora, I. Rey-Stolle (John Wiley & Sons, Ltd, 2016).
- [2] M.A. Green, E.D. Dunlop, D.H. Levi, *et al*, Solar cell efficiency tables (version 54). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* (2019); 27:565–575. <https://doi.org/10.1002/pip.3171>
- [3] Н.,А. Паханов, В.М. Андреев, М.З. Шварц, *Автоматика*, **54**, 93 (2018).
- [4] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts, *III–V solar cells and concentrator arrays in High-efficient low-cost photovoltaics: recent developments*, Editors: Petrova-Koch, Vesselinka, Hezel, Rudolf, Goetzberger, Adolf (Eds.), 2020, Pages 133–174

Магнитокалорический эффект и проблема магнитного охлаждения

А.А. Фраерман

ИПМ, Нижний Новгород, Россия

1. Изменение температуры тела при намагничивании: токи Фуко, магнитный гистерезис. Открытие магнитокалорического эффекта: Warburg vs Weiss & Piccard [A. Smith, Who discovered the magnetocaloric effect? *Eur. Phys. J. H*, (2013)]. Термодинамика магнитокалорического эффекта, адиабатическое размагничивание.

2. Сверхнизкие температуры при адиабатическом размагничивании солей: P. Debye & W. Giauque. Механизмы взаимосвязи магнитной и решеточной подсистем твердого тела [Е. Амблер, Р.П. Хадсон, Магнитное охлаждение, *УФН* **67** 445 (1959)]

3. Магнитокалорический эффект в ферромагнетиках. Возможность создания магнитного холодильника: современное состояние проблемы [А.М. Tishin, Y.I. Spichkin, The magnetocaloric effect and its applications, CRC Press Published, 2003]

4. Пути увеличения эффективности магнитного охлаждения: магнитный эффект близости в многослойных структурах ферромагнетик/парамагнетик/ферромагнетик [А.А. Fraerman, I.A. Shereshevskii, Magnetocaloric effect in ferromagnet/paramagnet multilayer structures, *Jetp Lett.* **101**, 618 (2015), S.N. Vdovichev *et al*, High magnetocaloric efficiency of a NiFe/NiCu/CoFe/MnIr multilayer in a small magnetic field, *Phys. Rev. B* **98**, 014428, (2018)].

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 20-02-00356.

Gauge-invariant microscopic kinetic theory of superconductivity

M.W. Wu

Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026, China

Within the gauge-invariant kinetic equation, we study the electromagnetic response of the superconducting states. Both superfluid and normal-fluid dynamics

are involved. We predict that the normal fluid is present only when the excited superconducting velocity v_s is larger than a threshold $v_L = |\Delta|/k_F$. Interestingly, with the normal fluid, we find that there exists friction between the normal-fluid and superfluid currents. Due to this friction, part of the superfluid becomes viscous. Therefore, a three-fluid model: normal fluid, non-viscous and viscous superfluids, is proposed to capture the excited current in both magnetic and optical responses. Particularly, an exotic phase with both finite resistivity and superconducting gap is predicted in the magnetic response. We also calculate the response of the Nambu–Goldstone and Higgs modes. Both linear and second-order responses are addressed. In the linear regime, the response of the Higgs mode vanishes in the long-wave limit, and the response of the Nambu–Goldstone mode agrees with the previous works in the literature. Whereas the second-order response exhibits different physics. On one hand, a finite second-order response of the Higgs mode is obtained in the long-wave limit. We reveal that this response, which has been experimentally observed, is attributed solely to the drive effect rather than the widely considered Anderson-pump effect. On the other hand, a finite second-order response of the Nambu–Goldstone mode, free from the influence of the Coulomb interaction and hence the Anderson-Higgs mechanism, is predicted. A tentative scheme to detect this response is proposed.

Спиновые явления в коллоидных полупроводниковых нанокристаллах

Д.Р. Яковлев

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

Experimental Physics 2, TU Dortmund University, Dortmund, Germany

В лекции будет представлен обзор спин-зависимых явлений в полупроводниковых нанокристаллах выращенных методом коллоидного синтеза: квантовых точек и наноплателетов. Экспериментальные исследования проводились различными оптическими методами детектирующими спиновую структуру, спиновую поляризацию и спиновую динамику. Спин-зависимые явления в коллоидных нанокристаллах существенно отличаются от явлений в эпитаксиальных квантовых точках. Мы обсудим эти различия и их причины. Наиболее ярким отличием является наличие поверхностных спинов в коллоидных нанокристаллах.

Эти исследования были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант 19-52-12064 NNIO-a), Российским Научным Фондом (Грант 20-42-01008) и Deutsche Forschungsgemeinschaft via International

Литература

- [1] D. Feng *et al*, *NANO Letters* **17**, 2844 (2017).
- [2] L. Biadala *et al*, *Nature Nanotechnology* **12**, 569 (2017).
- [3] D. Canneson *et al*, *NANO Letters* **17**, 6177 (2017).
- [4] W.D. Rice *et al*, *NANO Letters* **17**, 3068 (2017).
- [5] E.V. Shornikova *et al*, *NANO Letters* **18**, 372 (2018).
- [6] E.V. Shornikova *et al*, *Nanoscale* **10**, 646 (2018).
- [7] D.R. Yakovlev and A.V. Rodina, *J. Electronic Materials* **47**, 4260 (2018).
- [8] А.В. Родина, А.А. Головатенко, Е.В. Шорникова, и др., *Физика твердого тела* **60**, 1525 (2018)
- [9] А.В. Родина и Д.Р. Яковлев, *Природа* **9**, 22 (2018)
- [10] R. Hu *et al*, *J. Phys. Chem. Lett.* **10**, 3681 (2019)
- [11] R. Hu *et al*, *J. Phys. Chem. Lett.* **10**, 4994 (2019)
- [12] V. Pinchetti *et al*, *NANO Letters* **19**, 8846 (2019)
- [13] D. Kudlacik *et al*, *NANO Letters* (2019) <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b04262>

Новые плазменные возбуждения в двумерных электронных системах

И.В. Андреев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., Россия

При изучении твердого тела мы всегда имеем дело с системой многих взаимодействующих частиц. На сегодняшний день отсутствуют подходы для точного решения данной задачи многих тел. Таким образом, при построении теории приходится применять приближенные модели. Именно это использование приближенных моделей составляет одну из привлекательных черт физики твердого тела. Из-за того, что экспериментальная проверка идей в физике твердого тела осуществляется сравнительно просто, то она представляет собой уникальную площадку для проверки новых концепций и подходов. Одной из самых плодотворных идей в физике твердого тела является концепция элементарных возбуждений [1]. Оказалось, что сложное и взаимосвязанное движение системы многих частиц в твердых телах можно описать в терминах элементарных возбуждений (квазичастиц), лишь слабо взаимодействующих между собой.

Элементарные возбуждения разделяют на одночастичные и коллективные. Сначала в теории производится целый ряд квантовомеханических операций: вводится газ одночастичных элементарных возбуждений — квазичастиц под

названием «электроны» со сложным законом дисперсии, отражающим симметрию кристаллической решетки. Далее в системе взаимодействующих электронов вследствие кулоновского взаимодействия возникают коллективные колебания плотности электронов, так называемые плазменные колебания [2–4]. Квант плазменных колебаний называется плазмоном. Задача распространения плазменных волн вдоль металлического провода была решена более 100 лет тому назад Зоммерфельдом [5]. В его работах было показано, что электромагнитная волна вдоль провода распространяется со скоростью света. Именно посредством этих плазмон-поляритонных волн переменный сигнал передается вдоль современных линий электропередач.

Недавно было обнаружено, что в гибридной системе, состоящей из металлического затвора, помещенного рядом с двумерной электронной системой (ДЭС) возникает новое семейство плазменных возбуждений [6–10]. Было показано, что новые плазменные волны распространяются вдоль затвора и не имеют потенциальных узлов в перпендикулярном направлении. Установлено, что новые плазменные волны обладают уникальной дисперсией, отличающейся от случая 2Д плазмонов как в системе с бесконечным экранирующим затвором, так и в системе без затвора

$$\omega_{pr}(q) = \sqrt{\frac{2n_S e^2 h}{m^* \epsilon \epsilon_0} \frac{q}{W}},$$

$$(qW \ll 1)$$

где q — волновой вектор вдоль полоски затвора с шириной W , n_S — двумерная электронная концентрация, h — расстояние от ДЭС до затвора, m^* и e — эффективная масса и заряд носителей заряда. В экспериментах было обнаружено, что открытая плазменная мода имеет особый характер гибридизации со световыми волнами. Образующаяся при этом плазмон-поляритонная волна обладает аномально малым затуханием. Это свойство делает возможным наблюдение новой плазменной моды вплоть до комнатной температуры [7].

Новые плазменные возбуждения, возникающие в гибридной системе ДЭС с близким затвором, были исследованы в различных геометриях образца. В частности, была подробно исследована геометрия с отверстием в затворе в форме диска. Показано, что в такой геометрии новая плазменная мода обладает целым рядом уникальных физических свойств. Во-первых, зависимость частоты плазменной моды от обратной ширины носит не корневой характер. Во-вторых, в геометрии диска удастся возбудить целый ряд кратных гармоник, по поведению которых удастся судить о физической природе гибридизации со светом. Работа выполнена в рамках госзадания ИФТГ РАН при ча-

стичном финансировании РФФИ (грант № 18-02-00753). В работе принимали участие В.М. Муравьев, П.А. Гусихин, И.В. Кукушкин.

Литература

- [1] L. Landau, *Phys. Rev.* **60**, 356 (1941).
- [2] D. Bohm, D. Pines, *Phys. Rev.* **82**, 625 (1951).
- [3] D. Pines, D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 338 (1952).
- [4] D. Bohm, D. Pines, *Phys. Rev.* **92**, 609 (1953).
- [5] A. Sommerfeld, *Annalen der Physik*, **303**, 233 (1899).
- [6] П.А. Гусихин, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин, *Письма в ЖЭТФ* **100**, 732 (2014).
- [7] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, I.V. Andreev, *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 106805 (2015).
- [8] A.A. Zabolotnykh, V.A. Volkov, *Phys. Rev. B* (2019).
- [9] V M. Muravev, P.A. Gusikhin, A. . Zarezin, *et al*, *Phys. Rev. B* **99**, 241406(R) (2019)
- [10] V.M. Muravev, A.M. Zarezin, P.A. Gusikhin, *et al*, *Phys. Rev. B* **100**, 205405 (2019).

Нелинейная оптика диэлектрических наноантенн и метаповерхностей

А.А. Федянин

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Диэлектрические наноструктуры, поддерживающие возбуждение оптических резонансов Ми— наноантенны и метаповерхности — позволяют выявить новые физические эффекты, которые могут использоваться во многих приложениях от перестраиваемых антенн и плоских оптических устройств до сверхчувствительных датчиков и активных нанофотонных компонентов. В докладе обсуждаются различные оптические эффекты в полностью диэлектрических структурах, состоящих из ми-резонансных наночастиц, при их взаимодействии с фемтосекундными лазерными импульсами. Рассматриваются особенности нелинейно-оптических эффектов, основанных на квадратичной и кубической нелинейностях резонансных диэлектрических наноструктур и обусловленных локализацией света при перестройке длины волны лазерного импульса через электрические и магнитные дипольные резонансы [1–2]. Особое внимание уделяется олигомерам наночастиц, состоящим из нескольких, вплоть до четырех, наночастиц, и проявляющих коллективные оптические резонансы, природа которых связана с гибридизацией резонансов одиночных наночастиц [3–4]. Рассматриваются эффекты сверхбыстрого, пико- и субпикосекундного, полностью оптического переключения в субволновых нелинейных диэлектрических наноструктурах, проявляющих локализованные магнитные

резонансы Ми [5–7], а также результаты наблюдения оптического переключения на основе поверхностных волн Блоха и оптических состояний Тамма в одномерных фотонных кристаллах [8–9]. Обсуждаются перспективы практического применения обнаруженных эффектов для создания новых активных нанопотонных устройств с низкими оптическими потерями.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-29-20097-мк.

Литература

- [1] M.R. Shcherbakov, D.N. Neshev, B. Hopkins, *et al*, *Nano Letters* **14**, 6488 (2014).
- [2] K.I. Okhlopkov, P.A. Shafirin, A.A. Ezhov, *et al*, *ACS Photonics* **6**, 189 (2019).
- [3] A.S. Shorokhov, E.V. Melik-Gaykazyan, D.A. Smirnova, *et al*, *Nano Letters* **16**, 4857 (2016).
- [4] M.K. Kroychuk, D.F. Yagudin, A.S. Shorokhov, *et al*, *Adv. Opt. Mater.* **7**, 1900447 (2019).
- [5] M.R. Shcherbakov, P.P. Vabishchevich, A.S. Shorokhov, *et al*, *Nano Letters* **15**, 6985 (2015).
- [6] M.R. Shcherbakov, S. Liu, V.V. Zubyuk, *et al*, *Nature Commun.* **8**, 17 (2017).
- [7] V.V. Zubyuk, P.P. Vabishchevich, M.R. Shcherbakov, *et al*, *ACS Photonics* **6**, 2797 (2019).
- [8] B.I. Afinogenov, V.O. Bessonov, I.V. Soboleva, *et al*, *ACS Photonics* **6**, 844 (2019).
- [9] B.I. Afinogenov, A.A. Popkova, V.O. Bessonov, *et al*, *Phys. Rev. B* **97**, 115438 (2018).

Диагностика гетероструктур. Современные подходы

П.А. Дементьев

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

В настоящее время, в связи с развитием технологии создания гетероструктур, особенно с малыми размерами, к методам их диагностики предъявляются повышенные требования. Зачастую оказывается, что классические подходы диагностики с использованием одного метода являются неэффективными. Вместо этого на передний план выходят комплексы диагностических методов, используемых в совокупности.

Зондовые методы исследования, такие как атомно-силовая и сканирующая туннельная микроскопия, давно играют важную роль в исследованиях как отдельных полупроводниковых материалов, так и гетероструктур в целом. В докладе будут представлены результаты исследований гетероструктур как отдельно зондовыми методами, так и в сочетании с другими методиками. Будут приведены результаты успешных исследований сколов гетероструктур,

позволяющие не только оценивать наличие дефектов на границах слоев, но и визуализировать области падения приложенного к структуре потенциала. Также зондовые методы, в сочетании с рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, спектроскопии анизотропного отражения и спектроскопией комбинационного рассеяния, дают возможность определить физико-химические процессы, происходящие на границе полупроводник-широкозонный материал при химической пассивации. В данном случае удастся доказать не только изменение химического состава слоев на поверхности полупроводника, но и изменение изгиба зон, положения уровня Ферми и других электронных свойств.

Кроме того, показано, что для исследования Ван-дер-ваальсовых наногетероструктур применение комбинации зондовых методов, спектроскопии комбинационного рассеяния и методов исследования магнитных и электрических свойств дает более глубокое понимание свойств получаемых гетероструктур.

Часть результатов, приведенных в докладе, получена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-03-00523)

Кристаллы для квантовой памяти

М.Н. Попова

Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

В настоящее время большое внимание уделяется практической реализации оптической квантовой памяти (ОКП) — необходимой части различных устройств квантовой информатики, в частности, квантовых повторителей, предназначенных для увеличения протяженности уже функционирующих линий криптографической квантовой связи. Схемы ОКП базируются на так называемой трехуровневой Λ системе. Среди различных возможных схем, два уровня сверхтонкой структуры (СТС) основного состояния редкоземельных (РЗ) ионов в кристаллах, в комбинации с третьим (метастабильным) уровнем в оптическом диапазоне рассматриваются в качестве наиболее перспективных кандидатов для реализации эффективной трехуровневой Λ системы [1].

В лекции будут рассмотрены требования к кристаллам и то, какие характеристики конкретных материалов существенны для ОКП. Это — точные положения уровней, оптическая плотность, времена когерентности сверхтонких уровней, времена жизни метастабильных оптических уровней, сверхтонкая структура (СТС) уровней, неоднородная ширина спектральных линий.

Наша группа в сотрудничестве с несколькими отечественными и зарубежными группами изучает спектроскопические свойства кристаллов, активиро-

ванных РЗ ионами, существенные для применения в ОКП. Будет дан краткий обзор некоторых результатов по исследованию СТС и формы линий в спектрах РЗ ионов в различных кристаллах [2–8]. Также будет рассмотрено недавнее первое наблюдение антипересечения сверхтонких уровней в оптических спектрах в магнитном поле. Явление наблюдалось в спектрах моноизотопного кристалла ${}^7\text{LiYF}_4$. Но. На антипересечениях могут быть построены Λ (или V) системы с равной вероятностью переходов в обоих плечах системы.

Работа поддержана РФФИ (грант №18-52-52001 МНТ).

Литература

- [1] Ph. Goldner, A. Ferrier, O. Guillot-Noël. Rare-earth-doped crystals for quantum information processing. In: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, **46**, Ch. 267. Elsevier, 2015.
- [2] E.P. Chukalina, M.N. Popova, S.L. Korableva, *et al*, *Phys. Lett. A* **269**, 348 (2000).
- [3] M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, *et al*, *Phys. Rev. B* **61**, 7421 (2000).
- [4] D.S. Pytalev, E.P. Chukalina, M.N. Popova, *et al*, *Phys. Rev. B* **86**, 115124 (2012).
- [5] M.N. Popova, *Optical Materials*, **35**, 1842 (2013).
- [6] G.S. Shakurov, E.P. Chukalina, M.N. Popova, *et al*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16** (45), 24727 (2014).
- [7] M.N. Popova, K.N. Boldyrev, *Optical Materials*, **63**, 101 (2017).
- [8] M.N. Popova, S.A. Klimin, S.A. Moiseev, *et al*, *Phys. Rev. B* **99**, 235151 (2019)
- [9] K.N. Boldyrev, M.N. Popova, B.Z. Malkin, *et al*, *Phys. Rev. B* **99**, 041105(R) (2019)

Электрофизика границы полупроводник–водяной пар

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В лекции кратко излагаются электрические свойства водяного пара и жидкой воды. Обсуждаются явления при физической и химической адсорбции воды и углекислого газа на поверхности изоляторов, полупроводников и металлов, а также приборных структур (см., например, [1–5] и приведенные там ссылки).

Солнце, вода и полупроводниковые материалы предопределили процесс зарождения и эволюции жизни на Земле [6,7]. Ключевую роль в этом определено сыграли фотокаталитические процессы на поверхности оксидных полупроводников [8], а также разделение электрических зарядов на фронте испарения (конденсации) воды и льда [9] и при фотосинтезе в растениях [10]. Ныне пришло время электрохимии низкоразмерных полупроводниковых си-

стем [11,12] частично минимизировать все еще существующий дефицит электроэнергии [13] в масштабах от портативного до регионального [14].

Воду можно «разобрать» на водород и кислород, а затем «сложить» обратно (Г. Кавендиш и др.). Важным для гидро- и биосферы является свойство воды уменьшать свою плотность при замерзании (это свойство впервые отмечено Г. Галилеем). Гипотеза о том, что вода обладает долговременной (сутки и более) памятью о прошлых механических, электрических, магнитных и оптических воздействиях на нее, не находит подтверждения в эксперименте [15].

Водяной пар составляет менее 0.5% массы земной атмосферы, но обуславливает $\approx 70\%$ атмосферного поглощения солнечного излучения в диапазоне от микроволнового до ультрафиолетового [16]. Влажность воздуха над суши и перепады температуры суши в течение суток связаны отрицательной обратной связью (проявление принципа Ле Шателье–Брауна), т.е. суточные перепады температуры на суше тем меньше, чем больше влажность воздуха [17,18]. Грозовые облака содержат воду в виде отдельных молекул, жидких капель, льдинок и снежинок. В восходящих и нисходящих потоках воздуха происходит их биполярное заряджение, что в итоге порождает молнии (см., например, [19,20]). Отметим, что на принципе разделения зарядов двух потоков капель воды в гравитационном поле Земли работает капельница Кельвина — генератор статического электричества (см., например [21]). Наблюдается также заряджение капель воды, скользящих по наклонной поверхности аморфного кремния [22].

В последнее время было установлено необычное поведение деионизованной воды во внешнем электрическом поле при лабораторных условиях [23,24]. Конкретно, обнаружено образование «водяного мостика», когда в ряд стоящие два тефлоновых стакана с водой погружают платиновые электроды и создают между ними постоянное электрическое напряжение ≈ 15 кВ. Вначале в стакане с анодом, а затем и в стакане с катодом на поверхности воды возникают возвышения, которые, сливаясь, образуют водяную перемычку (мостик) с диаметром поперечного сечения ≈ 3 мм. После этого стаканы можно отодвинуть один от другого и увеличить длину мостика до 3 см. Из-за разогрева мостика ионным током время его существования ограничено (≈ 45 мин), а при температуре воды выше 75°C он не возникает. По гипотезе [25] элементами мостика являются ассоциаты шаровидной формы из молекул воды (т.н. эмулоны диаметром до 100 мкм).

Полупроводники открыл М. Фарадей, установивший, что электрическая проводимость сернистого серебра в твердом агрегатном состоянии увеличивается как при внешнем нагревании (теплом от руки или свечи), так и при нагревании возбуждаемым в нем током (см. эссе [26]). Исследования полу-

проводниковых материалов и приборов привели к созданию микро-, опто- и акустоэлектроники, во многом обусловивших прогресс во всей техносфере [27,28]. Именно полупроводники оказались повсеместно востребованными благодаря возможности формировать на их основе одновременно и чувствительные, и стабильные компактные приборные структуры [29].

В работе [30] указано на возможность прямого преобразования в темноте химической энергии рекомбинации акцепторно- и донорноподобных газов на двойном электрическом слое полупроводникового $p-n$ -перехода в энергию электрического тока. Схема генерации электрической энергии при каталитической диссоциации молекулярных газов на поверхности гетероструктуры металл–полупроводник со стороны металла предложена и реализована в [31–33]. В работе [34] получена генерация хемотока на селеновом $p-n$ -переходе под действием на переход потока атомарного водорода. (По расчетам [35] энергия ионизации атома водорода на поверхности металла, когда расстояние между протоном и атомами металла оказывается несколько меньше боровского радиуса, обращается в нуль.)

В обзоре [36] обсуждаются актуальные вопросы очистки сточных вод. Как пример рассматривается электрохимическое окисление органики на поверхности электродов из легированных бором пленок поликристаллического алмаза. Такие пленки алмаза p -типа обычно получают химическим осаждением углеводородного пара на инженерные поверхности [37].

В заключение обозначаются перспективы исследований по тематике лекции и ассоциированные с ними гипотезы.

Работа поддержана государственной программой научных исследований «Физматтех» Республики Беларусь, БРФФИ (грант № Ф18Р-253) и проектом H2020-MSCA-RISE-2019-871284 SSHARE.

Литература

- [1] C.W. Extrand, *Langmuir*, **32**, 7697–7706 (2016).
- [2] M. Zubair, H. Kim, A. Razzaq, *et al*, *J. CO₂ Util.*, **26**, 70–79 (2018).
- [3] Y. Wang, Z. Zhang, L. Zhang, *et al*, *J. Am. Chem. Soc.*, **140**, 14595–14598 (2018).
- [4] N.A. Poklonski, S.V. Ratkevich, S.A. Vyrko, *et al*, *Int. J. Nanosci.*, **18**, 1940008 (2019).
- [5] В.М. Арутюнян, *УФН*, **158**, 255–291 (1989).
- [6] M.-W. Ho, *Int. J. Des. Nat. Ecodyn.*, **9**, 1–12 (2014).
- [7] А.А. Красновский, В.В. Никандров, *Природа*, **12**, 39–41 (1988).
- [8] Photocatalysis and Water Purification: From *Fundamentals to Recent Applications*, ed. by P. Pichat (Wiley, Weinheim, 2013).
- [9] А.В. Шавлов, В.А. Джуманджи, А.А. Яковенко, *ЖТФ*, **88**, 498–506 (2018).
- [10] А.Г. Яковлев, В.А. Шувалов, *УФН*, **186**, 597–625 (2016).
- [11] R.M. Penner, Yu. Gogotsi, *ACS Nano*, **10**, 3875–3876 (2016).

- [12] Y. He, Q. He, L. Wang, *et al*, *Nat. Mater.*, **18**, 1098–1104 (2019).
- [13] П.Л. Капица, *УФН*, **118**, 307–314 (1976).
- [14] А.Г. Забродский, *УФН*, **176**, 444–449 (2006).
- [15] Г.Р. Иваницкий, А.А. Деев, Е.П. Хижняк, *УФН*, **184**, 43–74 (2014).
- [16] М.Ю. Третьяков, М.А. Кошелев, Е.А. Серов, и др., *УФН*, **184**, 1199–1215 (2014).
- [17] Б.М. Смирнов, *УФН*, **184**, 1153–1176 (2014).
- [18] А.В. Бялко, *УФН*, **182**, 111–116 (2012).
- [19] А.И. Григорьев, О.А. Синкевич, *ЖТФ*, **54**, 1276–1283 (1984).
- [20] В.А. Саранин, *ЖТФ*, **68**, 16–21 (1998).
- [21] M. Zahn, *Am. J. Phys.*, **41**, 196–202 (1973).
- [22] A.Z. Stetten, D.S. Golovko, S.A.L. Weber, *et al*, *Soft Matter*, **15**, 8667–8679 (2019).
- [23] E.C. Fuchs, K. Gatterer, G. Holler, *et al*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 185502 (2008).
- [24] A.D. Wexler, E.C. Fuchs, J. Woissetschlager, *et al*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **21**, 18541–18550 (2019).
- [25] А.Н. Смирнов, *Наука и жизнь*, **10**, 64–67 (2011).
- [26] Б.В. Царенков, *ФТП*, **17**, 2113–2115 (1983).
- [27] В.С. Вавилов, *УФН*, **165**, 591–594 (1995).
- [28] Ю.В. Гуляев, *УФН*, **175**, 887–895 (2005).
- [29] Н.А. Поклонский, *Наука и инновации*, **8**, 64–69 (2016).
- [30] В.Н. Маслов, *ФТП*, **11**, 1510–1514 (1977).
- [31] B. Gergen, N. Nienhaus, W.H. Weinberg, *et al*, *Science*, **294**, 2521–2523 (2001).
- [32] В.Ф. Харламов, А.В. Костин, М.В. Кубышкина, и др., *ФТП*, **42**, 60–67 (2008).
- [33] В.П. Гранкин, Д.В. Гранкин, *Письма в ЖТФ*, **41**, 29–36 (2015).
- [34] В.В. Стыров, С.В. Симченко, *Письма в ЖЭТФ*, **96**, 343–346 (2012).
- [35] О.В. Константинов, В.Д. Дымников, М.А. Митцев, *ФТП*, **42**, 947–949 (2008).
- [36] Y. He, H. Lin, Z. Guo, *et al*, *Sep. Purif. Technol.*, **212**, 802–821 (2019).
- [37] А.К. Ребров, *УФН*, **187**, 193–200 (2017).

Для заметок

**Международная зимняя школа
по физике полупроводников
2020**

Научная программа и тезисы докладов

ISBN 978-5-93634-063-5

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»
188350, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 36, тир. 150, уч.-изд. л. 3,25, 10.02.2020 г.