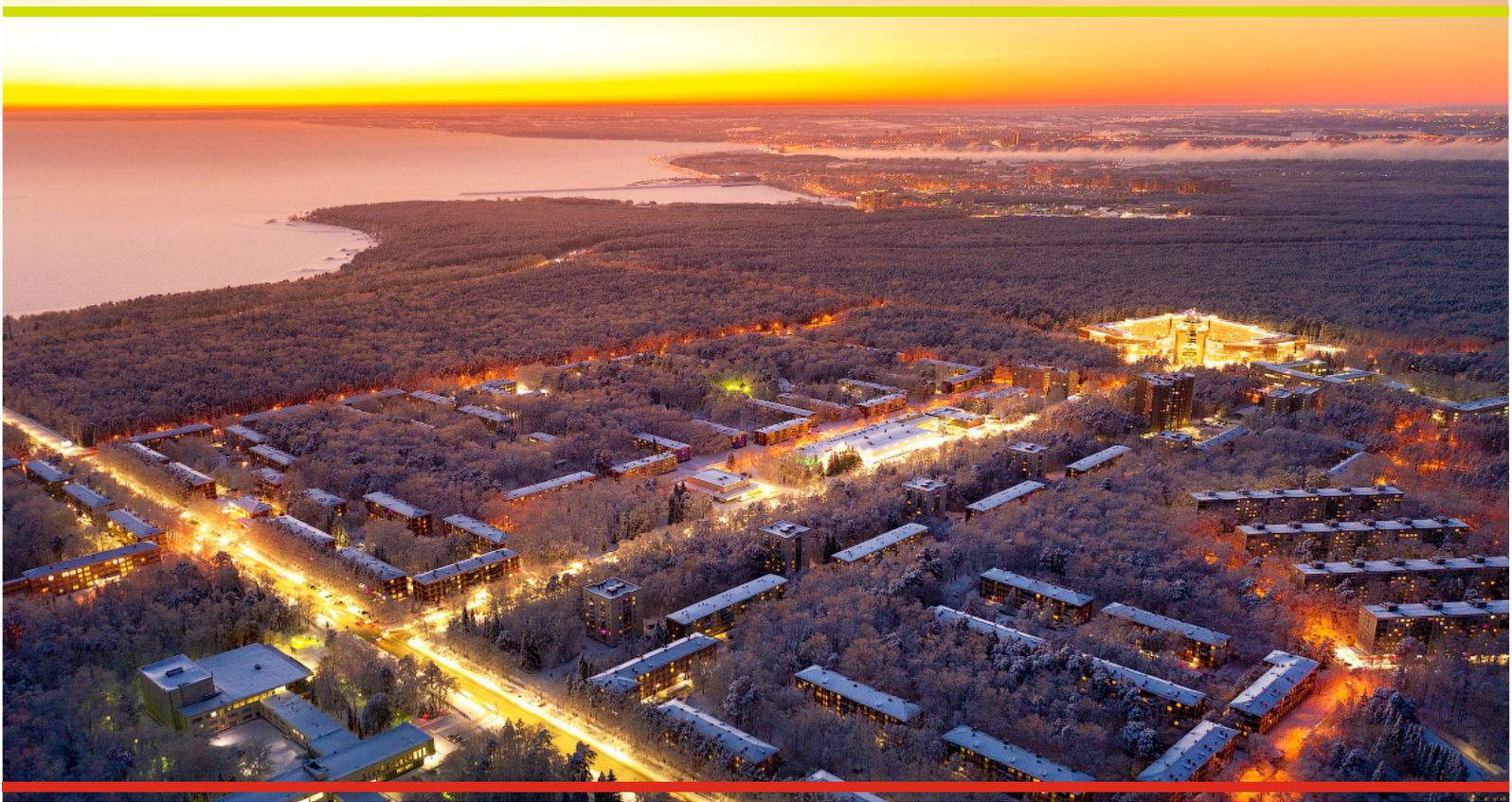




ОФКС-2023

**Школа молодых ученых по оптическим и
фотоэлектрическим свойствам
полупроводниковых квантовых систем
«Оптика и фотоэлектрика квантовых систем»**



ТЕЗИСЫ

Новосибирск, 8-9 ноября 2023

www.isp.nsc.ru/ofks_2023

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**Школа молодых ученых
по оптическим и фотоэлектрическим свойствам
полупроводниковых квантовых систем
«Оптика и фотоэлектрика квантовых систем»**

8–9 ноября, Новосибирск

**Новосибирск
2023**

УДК 53

ОФКС-2023: Тезисы докладов Школы молодых учёных по оптическим и фотоэлектрическим свойствам полупроводниковых квантовых систем «Оптика и фотоэлектрика квантовых систем», Новосибирск, 8–9 ноября 2023 г..
— Новосибирск, ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН: Типография ООО «ДигитПро», 2023. — 40 с.

Школа проведена при поддержке Российского научного фонда,
грант № 23-72-30003.

© ФГБУН Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН, 2023

Подписано в печать 24.10.2023. Формат В5
Тираж 40 экз. Заказ №999.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Квон Зе Дон

Секретарь

Родякина Екатерина Евгеньевна

Члены организационного комитета

Наумова Ольга Викторовна

Щеглов Дмитрий Владимирович

Ситников Сергей Васильевич

Адрес и контакты организационного комитета:

ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

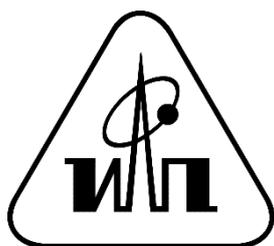
630090 Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 13

school-ofks@yandex.ru

Родякина Екатерина Евгеньевна

Тел. +7-(383)-330-90-82

ОРГАНИЗАТОР



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук
www.isp.nsc.ru

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА



Российский научный фонд
www.rscf.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИГЛАШЁННЫЕ ДОКЛАДЫ	6
Универсальная память: миф или будущее?	7
<i>Исламов Д.Р.</i>	
Молекулярно-лучевая эпитаксия HgCdTe для детекторов и источников ИК излучения.....	9
<i>Михайлов Н.Н.</i>	
Квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами	11
<i>Рябцев И.И., Бетеров И.И., Третьяков Д.Б., Энтин В.М., Якшина Е.А., Преображенский В.В., Чистохин И.Б., Неизвестный И.Г.</i>	
Рассеяние света покрытиями из частиц субволнового размера	12
<i>Шкляев А.А.</i>	
Фототоки, индуцированные структурированным излучением	14
<i>Тарасенко С.А.</i>	
Современные тенденции развития комбинационного рассеяния в исследовании низкоразмерных полупроводниковых структур: от микро- к нано	15
<i>Курусь Н.Н., Небогатикова Н.А., Милёхин И.А., Басалаева Л.С., Антонова И.В., Родякина Е.Е., Милёхин А.Г., Семенова О.И., Щеглов Д.В., Ситников С.В., Федина Л.И., Роголо Д.И., Гутаковский А.К., Родякин С.В., Насимов Д.А., Латышев А.В.</i>	
Туннелирование в поле электромагнитного излучения	17
<i>Ткаченко В.А.</i>	
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	19
Нелинейный эффект Холла и положительное магнетосопротивление в пленках трехмерного топологического изолятора (Bi,Sb) ₂ (Te,Se) ₃	20
<i>Баженов А.О., Степина Н.П., Шумилин А.В., Кириенко В.В., Ищенко Д.В., Терещенко О.Е.</i>	
Возможные механизмы формирования тонкой структуры в распределении по энергии электронов, эмитированных из p-GaAs(Cs,O)	22
<i>Казанцев Д.М., Бакин В.В., Шайблер Г.Э., Альперович В.Л., Голяшов В.А., Терещенко О.Е.</i>	
Вероятность выхода фотоэлектронов в вакуум из GaAs(Cs) и GaAs(Cs,O)	24
<i>Хорошилов В.С., Шайблер Г.Э., Альперович В.Л.</i>	

Особенности численного моделирования NV-центра во внешнем магнитном поле	26
<i>Козорез А.В.</i>	
Исследование сверхструктурных изменений методом ДБОЭ при синтезе Ge на Si(100)	27
<i>Кукенов О.И., Соколов А.С.</i>	
Особенности поведения СВЧ-фотопроводимости квантовых точечных контактов на основе различных AlGaAs/GaAs гетероструктур	28
<i>Кузьмин Н.С., Ярошевич А.С., Ткаченко В.А.</i>	
Теория комбинационного рассеяния света на двумерном вигнеровском кластере	29
<i>Махмудиан М.М., Махмудиан М.М., Энтин М.В.</i>	
Электронная структура PbSnTe:In с составами вблизи точки инверсии зон.....	30
<i>Микаева А.С., Голяшов В.А., Тарасов А.С., Ищенко Д.В., Супрун С.П., Кавеев А.К., Терещенко О.Е.</i>	
Гальваномеханические эффекты в гексагональных дираковских 2D монослойных материалах	32
<i>Снегирев А.В., Ковалев В.М., Энтин М.В.</i>	
Особенности изменений картин дифракции при гомоэпитаксиальном росте Si на Si(100)	34
<i>Соколов А.С., Кукенов О.И.</i>	
Электронная и кристаллическая структура тонких плёнок Bi/InAs(111)A(2x2)	35
<i>Соловова Н.Ю., Голяшов В.А., Усачёв Д.Ю., Терещенко О.Е.</i>	
Фотопроводимость графена на кремниевой подложке	37
<i>Сорокин Д.В., Смовж Д.В.</i>	
Упорядоченные GeSi квантовые точки, встроенные в дисковые резонаторы....	38
<i>Рудева Я.С., Смагина Ж.В., Зиновьев В.А., Степихова М.В., Родякина Е.Е.</i>	
Авторский указатель	40

ПРИГЛАШЁННЫЕ ДОКЛАДЫ

Универсальная память: миф или будущее?

Исламов Д.Р.

ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В компьютерах, ноутбуках, планшетах, смартфонах и других электронных гаджетах используется множество типов памяти для различных целей. На Рис. 1 представлена история полупроводниковой индустрии: объём рынка в зависимости от времени. Всё началось в 1950-х годах с биполярных транзисторов, которые заменили электронные лампы. Затем каждые двадцать лет внедрялась новая технология электронной памяти. В 1970-х годах были изобретены интегральные схемы на основе кремния. На смену магнитной памяти пришла полупроводниковая оперативная память, появились компактные персональные компьютеры. В 1990-х годах появилась энергонезависимая флэш-память, сохраняющая информацию при отключении питания. Флэш-память заменила дискеты, CD, DVD и Blu-ray диски, жесткие диски (HDD) и теперь широко используются в компьютерах, смартфонах и других устройствах в качестве твердотельных накопителей (SSD).

В настоящее время силами учёных и инженеров микроэлектроники активно разрабатывается универсальная память [1]. Такая память сочетает в себе лучшие качества статической и динамической (DRAM) оперативной памяти (высокая производительность, почти неограниченное ($>10^{16}$) количество циклов перезаписи), HDD и флэш/SSD (энергонезависимость, высокая информационная ёмкость, низкая цена). Универсальная память потребует радикальной переработки компьютерной архитектуры. Такой компьютер включится мгновенно и продолжит работать как будто его и не выключали. Более того, универсальная память станет основой концепции «вычисления-в-памяти», которая позволит убрать шину между модулями процессоров и оперативной памяти, что будет востребовано системами искусственного интеллекта.

На текущий момент есть несколько технологий-претендентов на универсальную память [2]. Основными из них являются резистивная коммутационная память (RRAM), память с фазовым переходом (PCRAM), сегнетоэлектрическая память (FRAM) и магниторезистивная память (MRAM). Недавно была представлена весьма многообещающая технология для кандидата на роль универсальной

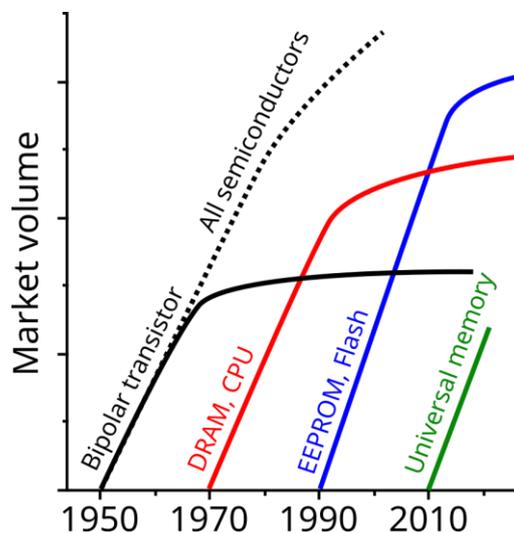


Рис.1. История полупроводниковой индустрии.

памяти [3], получившая название ULTRARAM. Она основана на резонансном туннелировании электрона между тремя энергетическими барьерами в квантовых ямах InAs/AlSb. Процесс туннелирования (перезаписи) происходит при приложении к структуре напряжения до 2,6 В, тогда как в отсутствие напряжения барьеры препятствуют прохождению электронов и удерживают их в ячейке без электропитания, что позволяет хранить записанные данные даже при комнатной температуре. Ожидается, что ULTRARAM без деградации выдерживает более 10^7 циклов со сроком хранения данных 1000 лет при нормальных условиях. ULTRARAM получила награду Best of Show Memory Technology Awards на саммите Flash Memory Summit в августе 2023 года. Стартап Quinas Technology в ближайшие несколько месяцев собирается создать тестовые матрицы ULTRARAM, совместимые с 20-нм КМОП процессом.

В докладе обсуждаются преимущества различных технологий энергонезависимой памяти и насколько они близки к универсальной памяти. Оказывается, ни одна из этих перспективных технологий энергонезависимой памяти пока не готова стать универсальной памятью. RRAM столь же быстра, как и DRAM, но объём готовых к использованию устройств не превышает 4 Мбит, а количество циклов переключений 10^6 значительно меньше требуемых. Устройства PCRAM имеют информационную ёмкость 128 Гб, но демонстрируют ресурс до 10^9 циклов и по-прежнему дороги для массового использования. Матрицы FRAM на основе титаната-цирконата свинца обладают высокой надёжностью (более 10^{14} циклов чтения/записи) и довольно длительным сроком хранения, но их ёмкость ограничена 1 МБ из-за большой проектной нормы 130 нм. Массивы FRAM на основе HfO_2 пока малы и не превышают 64 кбит (матрицы на 8 Гб пока находятся в стадии разработки). Ёмкость чипов MRAM ограничена 32 Мбит. Коммерчески доступная STT-MRAM ёмкостью 1 Гб, интегрированная в КМОП процесс 28 нм, обеспечивает сохранение данных в течение 3-х месяцев при 70 °С и срок службы 10^{10} циклов, что очень хорошо для энергонезависимых приложений DRAM, но не соответствует требованиям универсальной памяти. Дальнейшее развитие ULTRARAM требует адаптации процесса синтеза структур на основе молекулярно-лучевой эпитаксии для массового производства.

Для решения актуальных проблем учёные и инженеры составляют дорожные карты [4]. Подобные подходы дают надежду на то, что универсальная память будет реализована в ближайшем будущем – если не как устройство общего назначения, то, по крайней мере, в специализированных приложениях.

[1] Åkerman J., *Science*, **308**, 508 (2005).

[2] Kryder M.H., Kim C.S., *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3406 (2009).

[3] Tizno O. et al., *Sci. Rep.*, **9**, 8950 (2019).

[4] Silva J.P.B. et al., *APL Mater.*, **11**, 089201 (2023).

Молекулярно-лучевая эпитаксия HgCdTe для детекторов и источников ИК излучения

Михайлов Н.Н.

ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

Инфракрасное (ИК) видение открывает новые возможности в получении информации практически в любой области деятельности человека. Для решения задач, связанных с требованиями применения, проводятся интенсивные исследования и разработки технологий получения материалов, чувствительных и излучающих в различных областях ИК-спектра. Наибольший интерес представляет получение информации с помощью ИК видения в условиях окружающей среды, для которой существуют «окна прозрачности» в диапазоне ближнего (1-3 мкм), средневолнового (3-5 мкм) и длинноволнового (8-14 мкм) диапазонов ИК спектра. Твердые растворы теллурида кадмия и ртути (КРТ) занимают лидирующее место в разработках ИК видения, обеспечивая чувствительность в любом заданном диапазоне длин волн инфракрасного спектра.

Современные тенденции развития ИК оптоэлектронных систем на основе HgCdTe (КРТ) заключаются в разработке и изготовлении матричных фотодиодных фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ) различных форматов, работающих в широком интервале температур от 77К до 300К. Для получения высокого качества таких фотоприемников необходимо выращивать слои КРТ с высокой однородностью параметров на поверхности большой площади.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) является наиболее привлекательным методом для решения многих физических, технических и технологических проблем при изготовлении как фоточувствительных, так и излучающих гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) или наноструктур на различных подложках. Выбор «альтернативных» подложек большой площади из GaAs с буферными слоями позволяют решать многие задачи по снижению стоимости, существенного упрощения технологического процесса изготовления приёмников и источников ИК излучения для обеспечения требуемого спроса.

В докладе будут представлены результаты фундаментальных исследований процессов роста методом МЛЭ и легирования ГЭС КРТ МЛЭ и наноструктур на подложках из GaAs. Изучение процессов зарождения и последующего роста буферных слоев и слоев КРТ позволило определить факторы, влияющие на получение материала высокого качества, и механизмы образования дефектов, их природу и электрическое состояние [1].

Сверхвысоковакуумные многокамерные установки МЛЭ для роста ГЭС КРТ на подложках диаметром до 200 мм с точным контролем параметров с помощью in-situ эллипсометрического контроля позволяют решить проблемы производства ГЭС КРТ МЛЭ с высокой однородности состава КРТ слоя по площади поверхности. Приведены результаты по выращиванию многослойных ГЭС КРТ

МЛЭ с различным распределением состава КРТ по толщине для оптимизации параметров матричных фотоприемников [2].

Изучение процессов легирования индием и мышьяком позволило изменять тип электропроводности в широких пределах концентраций электронов и дырок. Рост гетероструктур HgCdTe с различным распределением состава по толщине позволяет получать материал с уникальными свойствами, которые позволяют улучшить параметры высококачественных ИК-детекторов на их основе за счет параметров структур и снижению технологических воздействий. Представлены результаты по технологии создания приемников (детекторов) фотодиодного типа N⁺-р и P⁺-n и ФПУ на их основе форматами до 2000×2000 элементов для спектральных диапазонов 1-3, 3-5 и 8-10 мкм [3].

Будут рассмотрены процессы выращивания nВn барьерных структур для детекторов спектрального диапазона 3-5 мкм. Темновой ток меза диодов лимитируется диффузионным механизмом в диапазоне температур от 180 до 300 К, что обеспечивает детектирование при повышенных температурах [4]. Температурная зависимость темнового тока хорошо соответствует эмпирической модели «Rule 07» (часть новой модели «Rule 22») для классических p-n переходов с предельными характеристиками.

Будут рассмотрены особенности роста структур с одиночными, множественными КРТ квантовыми ямами (КЯ). Энергетическое положение уровней размерного квантования определялось из измерений спектров поглощения и фотопроводимости в температурном интервале 77-298 К. Полученные температурные зависимости энергетического положения уровней размерного квантования от толщины и состава слоев КРТ в КЯ хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Установлена зависимость длинноволновой границы чувствительности фотосопротивлений множественных КЯ от температуры [5].

Для создания источников излучения в ИК и ТГц диапазонах будут рассмотрены процессы роста лазерных структур, включающих волноводные слои и активную область на основе КРТ КЯ. Характеризация таких структур определила их параметры и установила связь длины волны стимулированного излучения от толщины и состава КРТ. Наблюдалось стимулированное излучение в ИК и ТГц спектральных диапазонах с длиной волны 3-5 мкм при температурах вблизи комнатной [5] и до 31 мкм при 20 К, соответственно [6].

[1] Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N. et al., *The Growth of CdTe Layer on GaAs Substrate by MBE* ISBN: 978-1-78985-566-1, InTech, (2020).

[2] Сидоров Ю.Г. и др., *Фотоприёмные устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий-ртуть-теллур*, ISBN: 978-5-7692-1226-0, СО РАН (2012).

[3] Варавин В.С. и др., *Автометрия*, **56**, 12-26 (2020).

[4] Voitsekhovskii A.V. et al., *J. of Physics D: Appl. Phys.*, **53**, 055107 (2022).

[5] Utochkin V.V. et al., *Nanomaterials*, **12**, 2259 (2022).

[6] Rumyantsev V. V. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **121**, 182103 (2022).

Квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами

**Рябцев И.И.^{1,2}, Бетеров И.И.^{1,2}, Третьяков Д.Б.^{1,2}, Энтин В.М.¹,
Якшина Е.А.^{1,2}, Преображенский В.В.¹, Чистохин И.Б.¹,
Неизвестный И.Г.¹**

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Квантовая информатика – новое направление современной квантовой физики, в котором носителями информации или элементарными логическими ячейками являются одиночные квантовые объекты – фотоны, электроны, атомы, молекулы, ионы и т.д. Их основным отличием от классических объектов информатики является наличие специфических квантовых свойств: корпускулярно-волновой дуализм, дискретность энергетических состояний, квантовая суперпозиция состояний, возможность существования так называемых "перепутанных" квантовых состояний, связанная с ними нелокальность квантовых объектов и др.

Наиболее интересными направлениями квантовой информатики, которые могут иметь практические применения в ближайшем будущем, являются квантовые компьютеры и квантовая криптография. Квантовые компьютеры могут выполнять некоторые виды вычислений намного быстрее классических компьютеров. Квантовая криптография обеспечивает практически полную защищенность данных, передаваемых одиночными фотонами. Несмотря на несколько разные задачи, решаемые этими направлениями, они являются взаимосвязанными – именно потенциальная возможность создания квантовых компьютеров, умеющих за короткое время факторизовать (раскладывать на простые множители) большие числа, привела к созданию квантовой криптографии, которая, в отличие от классической криптографии, не требует факторизации больших чисел для расшифровки передаваемых данных.

В докладе будет дан краткий обзор современного состояния дел в области экспериментальной квантовой информатики с одиночными атомами и фотонами применительно к квантовым вычислениям и квантовым коммуникациям. Также представлены экспериментальные и теоретические результаты по лазерной спектроскопии одиночных ультрахолодных атомов и квантовой криптографии с одиночными фотонами, полученные авторами за последние годы в ИФП СО РАН.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-12-00067 в части квантовых операций с ридберговскими атомами и грантом РФФИ № 23-29-00472 в части квантовых коммуникаций с одиночными фотонами.

Рассеяние света покрытиями из частиц субволнового размера

Шкляев А.А.

ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поверхностные слои с антиотражающими свойствами необходимы для эффективной работы большинства оптических и фотоэлектронных приборов. Они обычно состоят из диэлектрических плёнок или текстурированных поверхностей, которые уменьшают отражения падающего света за счёт постепенного изменения показателя преломления от окружающей среды до подложки. [1]. Такие покрытия только незначительно изменяют направление распространения света в результате его преломления на границах раздела. По мере уменьшения толщины активной области фотоэлектронных преобразователей возникает потребность в покрытиях, которые могли бы не только обладать антиотражающими свойствами, но также перенаправлять падающее электромагнитное (ЭМ) излучение вдоль плоскости функциональных слоёв. Такими свойствами обладают покрытия, состоящие из диэлектрических частиц субволнового размера, в которых возбуждаются магнитные и электрические резонансы. Изменение направления рассеянного света происходит в результате так называемой деструктивной интерференции падающего излучения с ЭМ полями этих резонансов.

В зависимости от соотношения между длиной волны падающего излучения и размером диэлектрических частиц в них возбуждаются магнитные и электрические дипольные резонансы или резонансы более высоких порядков. Это обеспечивает их широкополосное действие в отличие от металлических частиц с возбуждением в них только поверхностных плазмонных резонансов. Поля резонансов направлены таким образом, что могут подавлять как отражённое, так и проходящее излучение. В результате происходит так называемый захват (light-trapping) излучения, при котором значительная его часть распространяется в направлении вдоль поверхностных слоёв или под небольшими к ним углами. Такое направление распространения рассеянного излучения может повысить эффективность тонкоплёночных фотоэлектронных преобразователей за счёт увеличения в них поглощения.

Один из наиболее простых способов получения покрытий из диэлектрических частиц основан на использовании явления твёрдотельного несмачивания, при котором осаждённый слой самоорганизуется в виде покрытия из компактных частиц на несмачиваемой подложке при температуре значительно меньшей температуры его плавления [2]. Так, плёнка Ge, исходно осаждённая на оксидированную поверхность кремния при комнатной температуре, трансформируется в массив компактных частиц при отжигах при температурах выше 350 °С (Рис. 1а) [3]. Такие покрытия характеризуются широким распределением частиц по

размеру, при этом их средний размер тем больше, чем больше толщина исходной плёнки Ge. Покрытия из частиц заданного размера, упорядоченных в периодическую решётку, могут быть получены с использованием электронной литографии (Рис.1b). Такие покрытия используются для изучения их оптических свойств в зависимости от геометрических размеров частиц и параметров решётки [4].

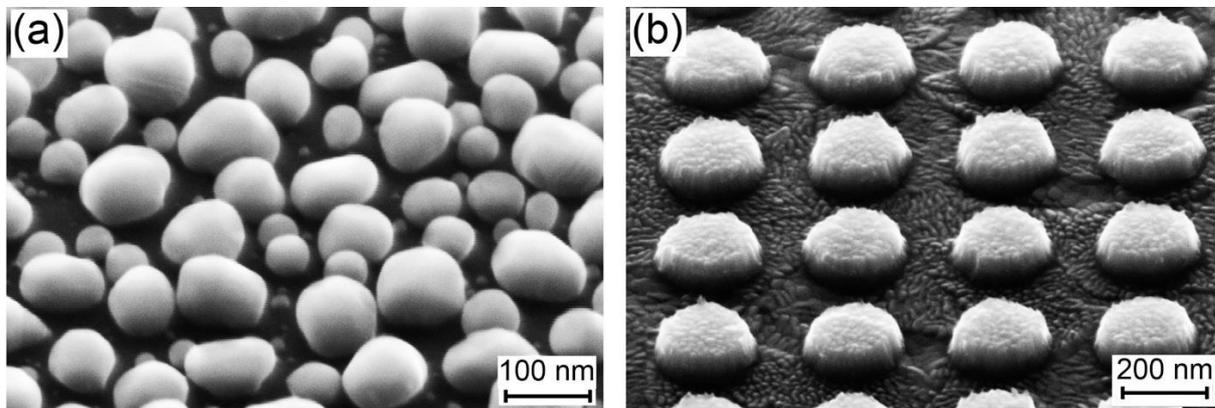


Рис.1. СЭМ-изображения частиц, полученных (a) в результате отжига плёнки Ge толщиной 30 нм в течение 10 мин при температуре 700 °С и (b) при использовании электронной литографии.

В решётке из упорядоченных частиц может наблюдаться поверхностный решёточный резонанс. На спектрах поглощения он выглядит как небольшой пик. Его появление свидетельствует о том, что доля излучения, распространяющегося исключительно в плоскости поверхностных слоёв, составляет величину около 10% от интенсивности падающего излучения (Рис.2) [5]. При этом около 30-40% излучения в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм распространяется под разными углами к поверхностным слоям, включая распространение под скользящими углами. Рассеянное излучение в таких направлениях может существенно повысить эффективность тонкоплёночных фотоэлектронных приборов.

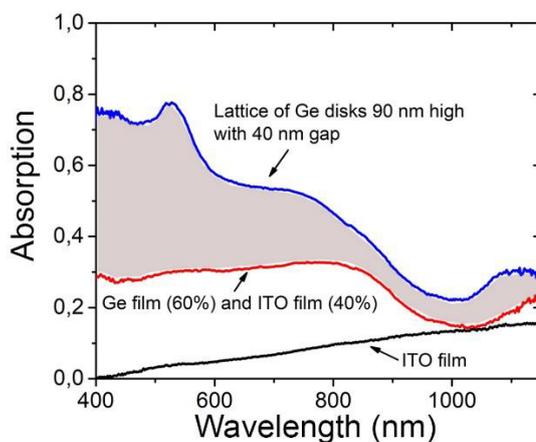


Рис.2. Спектр поглощения дисков Ge на 100-нм плёнке ITO на кварце.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-72-30003) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры» ИФП СО РАН и ВТАН НГУ.

[1] Yelisseyev A. et al., *Photonics*, **9**, 774 (2022).

[2] Shklyayev A.A., Latyshev A.V., *Sci. Rep.*, **10**, 13759 (2020).

[3] Shklyayev A.A., *Thin Solid Films*, **768**, 139720 (2023).

[4] Utkin D.E. et al., *Opt. Mater.*, **109**, 110466 (2020).

[5] Shklyayev A.A. et al., *Opt. Mater.*, **143**, 11417 (2023).

Фототоки, индуцированные структурированным излучением

Тарасенко С.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Рассматривается отклик двумерного электронного газа на структурированное излучение – излучение с пространственно неоднородными параметрами. Структурированный свет, примером которого являются волны с модулированной поляризацией или закрученные пучки, несущие орбитальный угловой момент, широко используется и имеет множество перспективных применений в физике, химии и биологии.

Нелокальность отклика двумерного электронного газа, взаимодействующего со структурированным излучением, приводит к возникновению направленных электрических токов. Такие токи могут быть обусловлены как градиентом интенсивности излучения, так и градиентами поляризационных параметров Стокса и градиентом фазы электромагнитного поля. В частности, фототоки возникают на границе доменов, возбуждаемых излучением с одинаковой интенсивностью, но различной линейной или циркулярной поляризацией.

В докладе обсуждается физика таких эффектов, механизмы генерации фототоков структурированным излучением терагерцового спектрального диапазона. В рамках кинетического подхода Больцмана разработана микроскопическая теория нелинейного нелокального транспорта электронов, получены аналитические выражения для различных вкладов в фототок [1]. Развитая теория применяется для изучения фототоков, индуцированных бесселевыми пучками, несущими орбитальный угловой момент. Фототоки, индуцированные закрученным излучением, имеют радиальную и азимутальную (вихреподобную) компоненты, пространственные распределения которых зависят от поляризации и углового момента пучка. Радиальные фототоки приводят к перераспределению электрического заряда в плоскости электронного газа и формируют радиальную фотоэдс. Азимутальные фототоки индуцируют постоянное магнитное поле и соответствующую намагниченность.

[1] *Gunyaga A.A., Durnev M.V., and Tarasenko S.A., Phys. Rev. B, 108, 115402 (2023).*

Современные тенденции развития комбинационного рассеяния в исследовании низкоразмерных полупроводниковых структур: от микро- к нано

**Курусъ Н.Н.¹, Небогатикова Н.А.¹, Милёхин И.А.^{1,2}, Басалаева Л.С.¹,
Антонова И.В.^{1,2}, Родякина Е.Е.^{1,2}, Милёхин А.Г.¹, Семенова О.И.¹,
Щеглов Д.В.^{1,2}, Ситников С.В.¹, Федина Л.И.¹, Роголо Д.И.¹,
Гутаковский А.К.¹, Родякин С.В.¹, Насимов Д.А.¹, Латышев А.В.^{1,2}**

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является быстрым, неразрушающим оптическим методом, применяемым в различных областях науки для исследования газов, жидкостей и твердых тел. Благодаря высокой чувствительности к особенностям структуры и химическому составу материалов, КРС является эффективным инструментом для оценки кристаллического совершенства твердых тел, оценки механических деформаций, уровня легирования и плотности дефектов в кристалле. При этом минимальные размеры исследуемой области образца, и, как следствие, информация о физических свойствах материала, ограничена дифракционным пределом, который составляет ~0.5 мкм. В то же время, непрерывное уменьшение размеров устройств и электронных компонентов приводит к необходимости изучения структурных и оптических свойств полупроводниковых материалов на нанометровом масштабе. Кроме того, малый тестируемый объем материала приводит к чрезвычайно слабому оптическому отклику системы, что обуславливает необходимость разработки методов его усиления. Комбинация зондовых и оптических методов привела к созданию усиленных зондом КРС и фотолюминесценции (нано-КРС и нано-ФЛ), при котором увеличение оптического отклика обеспечивается полем плазмона, локализованного в небольшой (~10нм) области вблизи металлизированного острия зонда атомно-силового микроскопа (АСМ), называемой горячей точкой. При этом уже размер горячей точки определяет пространственное разрешение в эксперименте. Таким образом, сохраняя все достоинства метода КРС, нано-КРС позволяет записывать пространственные карты распределения интенсивности колебательных спектров с шагом ~10нм, усиливая оптический отклик от образца в каждой точке до 10¹¹ раз. Еще большего усиления эмиссии света (КРС и/или ФЛ) можно достичь при исследовании спектров материала, помещенного в зазор между острием металлизированного зонда и металлическим элементом плазмонной подложки, за счёт реализации режима щелевого плазмона. [1].

Доклад посвящен применению методов микро- и нано-КРС в исследовании коллоидных полупроводниковых нанокристаллов CdSe/CdS [2,3], углеродных

нанотрубок [4], графена, мультиграфена [1] и ряда графеноподобных материалов, включая дихалькогениды переходных металлов (WS_2 , MoS_2) [5,6].

Исследованы спектры КРС массивов вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом микро- КР картирования вдоль оси трубок. Продемонстрирована неизменность радиальных дышащих мод (RBM) вдоль оси трубок, что указывает на их высокое структурное совершенство.

Выполнено исследование фононных спектров коллоидных наноплателеток $CdSe/CdS$ с различной толщиной оболочки CdS . Показано, что в спектрах КРС доминируют сигнал от ядра $CdSe$ и оболочки CdS на частотах примерно 200–210 и 250–300 cm^{-1} , соответственно. С увеличением толщины оболочки (от 1 до 4 монослоёв) наблюдались частотные сдвиги оптических мод, которые объясняются напряженно-деформированным состоянием ядра и оболочки, а также влиянием эффекта локализации фононов.

Исследовано nano-КРС в режиме щелевого плазмона оптическими колебаниями пленок графена и мультиграфена, расположенных на подложке в виде периодического массива золотых нанодисков. Достигнуто существенное усиление спектров nano-КРС графеном и мультиграфеном ($KU=130$). Выполнена оценка величин механической деформации в плёнках, возникающих при переносе на подложку с золотыми нанодисками.

Обсуждаются результаты микро- и nano-КРС и nano-ФЛ нанокристаллов двумерных островков дихалькогенидов переходных металлов (WS_2 и MoS_2).

[1] Kurus N.N. et al., *J. Phys. Chem. C*, **127** (10), 5013-5020 (2023).

[2] Kurus N.N. et al., *J. Phys. Chem. C*, **126** (16), 7107-7116 (2022).

[3] Kurus N.N. et al., *J. Phys: Conf. Ser.*, **2015** (1), 012076 (2021).

[4] Семенова О.И. и др., *Журнал Структурной Химии*, **63** (7), 98018 (2022).

[5] Krivonogova A.Y. et al., *2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), IEEE*, 190-193 (2023).

[6] Милёхин А.Г., *Автометрия*, **57** (5), 99 (2021).

Туннелирование в поле электромагнитного излучения

Ткаченко В.А.

ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Недавно выяснено, что самой простой управляемой и чувствительной фотоэлектрической квантовой системой является туннельный барьер в полевых транзисторах с коротким (100 нм) каналом. В лекции это будет показано, исходя из одночастичной квантовой механики и основных представлений об электрическом устройстве полевых транзисторов и о влиянии монохроматического электромагнитного поля на образец, т.е. влияния на высоту барьера под затвором и на подводящие проводники. Этот барьер дает основной вклад в сопротивление образца в туннельном режиме, т.е. когда кондактанс резко падает при увеличении отталкивающего напряжения на затворе, а в режиме насыщения кондактанса основной вклад в сопротивление дают подводящие проводники, которые устроены по-разному в кремниевом короткоканальном полевом транзисторе (ПТ) и образцах с коротким квантовым точечным контактом (КТК) в высокоподвижном двумерном электронном газе (ДЭГ).

Кремниевый ПТ р-типа и КТК в разных гетероструктурах GaAs/AlGaAs изготовлены в ИФП СО РАН, а теоретически ожидаемые квантовые эффекты найдены экспериментально здесь и (на наших образцах) в двух зарубежных лабораториях. В туннельном режиме, исходя из одномерной квантовой механики и линейной зависимости высоты барьера от затворного напряжения V_g , ожидалось экспоненциальное поведение характеристик $G(V_g)$, а также гигантский рост кондактанса G при облучении образца на частотах от 10^9 до 10^{12} Гц. Эти ожидания подтверждены измерениями при 4.2 К и численным моделированием экспериментальных результатов. В туннельном режиме ПТ, в согласии с двумерной квантовой механикой, на фоне экспоненциального поведения $G(V_g)$ имеется множество террас и узких резонансов, из-за большой концентрации примесей в кремнии, и после размытого порога следует режим насыщения в $G(V_g)$ при $V_g \rightarrow -3В$. В туннельном режиме КТК обнаружены ступеньки кондактанса чувствительные к состоянию примесной системы в AlGaAs/GaAs, а в открытом режиме КТК после $(0.5-0.7)G_0$, $G_0 = 2e^2/h$, следует почти линейный рост кондактанса до $G/G_0 \sim 10$, который завершается резким подъемом в результате затекания ДЭГ под половины расщепленного затвора и далее насыщением при $V_g \rightarrow 0$ и $G/G_0 \gg 10$. Это насыщение определяется исключительно проводимостью ДЭГ.

Исследован отклик кривых $G(V_g)$ в КТК и ПТ на увеличение мощности СВЧ-облучения образцов от предельно низкой до 10^{-6} Вт на выходе из генератора. Действие поля дополнительно ослаблено размещением жилы кабеля от

СВЧ-генератора в нескольких мм от образца и заземлением оплетки кабеля вместе со стоковым контактом к образцу. Обнаружено, что фотокондактанс в туннельном режиме всегда положителен. Увеличение подаваемой СВЧ-мощности ведет к росту туннельного кондактанса на порядки. В подпороговом режиме ПТ этот рост сопровождается размыванием террас и резонансов, а в асимптотике при $V_g \rightarrow -3\text{В}$ кондактанс увеличивается с облучением почти на порядок. В этом режиме насыщения кондактанс ПТ определяется исключительно слабо легированными подводящими проводниками р-типа, которые соединяют области сильного легирования р-типа, размещенные на дистанции 1 мкм друг от друга, с областью малой длины (100 нм) под затвором. Интересно, что в КТК ступеньки на $G(V_g)$ в туннельном режиме иногда появляются при СВЧ-облучении, хотя их не было в темновых $G(V_g)$, и знак фотокондактанса в открытом режиме КТК зависит от типа гетероструктур GaAs/AlGaAs и состояния примесной системы. Наблюдение этих случайных особенностей кондактанса и СВЧ-фотокондактанса служит новым свидетельством того, что КТК является мезоскопической системой, подобно ПТ при низкой температуре. Выявлен еще один новый факт, а именно то, что при использованной мощности СВЧ-облучения отклик проводимости ДЭГ на облучение противоположен отклику на обычный нагрев. Нагрев высокоподвижного ДЭГ всегда ведет к падению его проводимости, подобно металлу, тогда как СВЧ-облучение может повышать проводимость ДЭГ.

Лекция подготовлена в рамках проектов Российского научного фонда №19-72-30023, <https://rscf.ru/project/19-72-30023/> (теория), и №23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/> (эксперименты). Использован доступ к вычислительным ресурсам Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

Нелинейный эффект Холла и положительное магнетосопротивление в пленках трехмерного топологического изолятора $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$

Баженов А.О.^{1,2}, Степина Н.П.¹, Шумилин А.В.³, Кириенко В.В.¹,
Ищенко Д.В.¹, Терещенко О.Е.^{1,2}

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ ФТИ им Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Проявление уникальных свойств трехмерных (3D) топологических изоляторов (ТИ) привлекает большое внимание научного сообщества. Сочетание симметрии обращения времени и сильного спин-орбитального взаимодействия приводит к образованию поверхностных состояний на границе раздела данных материалов, которые описываются нечетным числом конусов Дирака с направлением спина, ортогональным волновому вектору, и однозначно с ним связанным. При этом поверхностные состояния устойчивы к обратному рассеянию на немагнитных примесях и дефектах. Благодаря данным свойствам ТИ являются перспективными материалами для их использования в качестве основы для спин-зависимых устройств.

В данной работе тонкие пленки $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$ (BSTS) 3D топологического изолятора были выращены с использованием методов молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111). Оптимизация параметров роста происходила с помощью контроля качества пленок методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. По данным АСМ, поверхность оптимизированных пленок представляет собой сросшиеся многослойные островки с огранкой треугольной формы с расстоянием между слоями, соответствующим толщине квинтислоя.

С целью изучения транспортных свойств были проведены измерения магнетосопротивления (МС), эффекта Холла и температурной зависимости проводимости исследуемых образцов. Наиболее известным транспортным проявлением дираковской дисперсии является слабая антилокализация (САЛ), т.е. индуцированное квантовой интерференцией при низких температурах и слабых магнитных полях положительное магнетосопротивление, амплитуда которого соответствует величине порядка кванта проводимости e^2/h . В настоящей работе проведено экспериментальное исследование магнито-транспортных свойств пленок

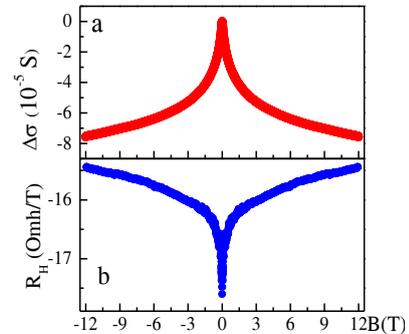


Рис. 1. *a*- Магнетопроводимость и *b*- константа Холла для пленки $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$. $T=1.64 \text{ K}$.

четырёхкомпонентного топологического изолятора на основе халькогенидов висмута и сурьмы (BSTS), выращенных с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111). Обнаружено положительное магнетосопротивление (МС), не насыщающееся вплоть до полей 12 Т. При его описании в области малых полей функцией Хиками [1] наблюдаются необычно высокие значения префактора α (2-3), не характерные для модели САЛ. Высоко-полевая часть МС слабо чувствительна к направлению магнитного поля и может быть описана с учетом электрон-электронного взаимодействия, которое изменяется в магнитном поле за счет эффекта Зеемана из-за достаточно больших значений g -фактора для таких пленок. Одновременно эффект Холла не является линейным в области слабых магнитных полей, где наблюдается САЛ. Увеличение коэффициента Холла в области малых магнитных полей по отношению к значениям в сильных магнитных полях может достигать величин более 10%.

Для совместного описания МС и эффекта Холла предложена модель, основанная на открытии щели в дираковском спектре поверхностных состояний за счет эффекта Зеемана и соответствующем перераспределении транспортных потоков. Этот механизм, совместно с эффектом слабой антилокализации и электрон-электронного взаимодействия, позволяет качественно объяснить наблюдаемые экспериментальные эффекты.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда и правительства Новосибирской области № 22-22-20074, <https://rscf.ru/project/22-22-20074/>.

[1] Hikami S. et al., *Progr. Theor. Phys.*, **63**, 707 (1980).

Возможные механизмы формирования тонкой структуры в распределении по энергии электронов, эмитированных из $p\text{-GaAs}(\text{Cs},\text{O})$

Казанцев Д.М.^{1,2}, Бакин В.В.^{1,2}, Шайблер Г.Э.^{1,2}, Альперович В.Л.^{1,2},
Голяшов В.А.^{1,2}, Терещенко О.Е.^{1,2}

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Известно, что изгиб зон вносит существенный вклад в формирование состояния с отрицательным эффективным электронным средством (ОЭС), которое формируется на поверхности сильнолегированного $p\text{-GaAs}$ при нанесении субнанометровых слоёв цезия и кислорода [1]. Благодаря высокому квантовому выходу фотоэмиссии, ОЭС-фотокатоды на основе $p\text{-GaAs}(\text{Cs},\text{O})$ уже несколько десятилетий используются в фотоэлектронных приборах, однако микроскопические механизмы переноса электронов через область изгиба зон, рассеяния, захвата на локализованные состояния и эмиссии в вакуум до сих пор поняты недостаточно и остаются предметом дискуссий. В ряде работ в измеренных распределениях электронов по нормальной к поверхности компоненте кинетической энергии, на фоне пьедестала с шириной, равной величине ОЭС, наблюдалась тонкая структура в виде пиков (рис. 1), обусловленных, предположительно, эмиссией электронов из состояний дна зоны проводимости [2] или из состояний двумерных подзон размерного квантования, сформированных в области изгиба зон [3,4], а также эмиссией из этих состояний с испусканием оптических фононов в области изгиба зон, при пересечении электроном поверхности [5] или после выхода в вакуум [6]. В данной работе проведён расчёт энергетических распределений электронов, эмитированных из $p\text{-GaAs}(\text{Cs},\text{O})$, для проверки и сравнения этих моделей.

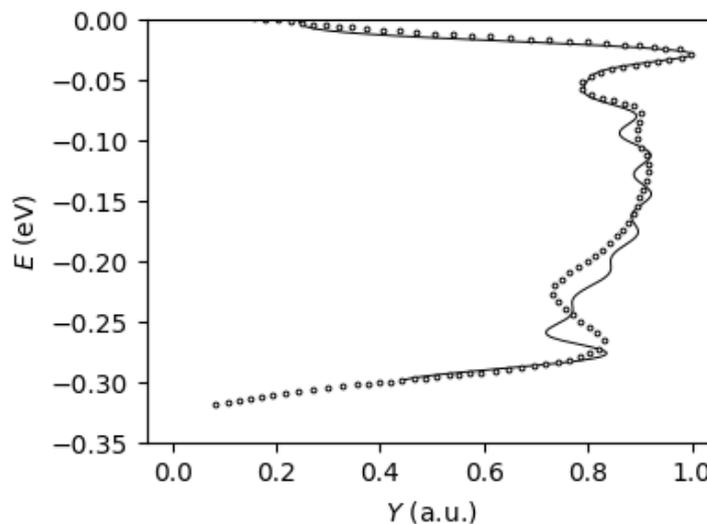


Рис. 1. Распределение эмитированных электронов по продольной энергии: эксперимент [4] (точки) и расчет в модели эмиссии из состояний двумерных подзон (линия).

В расчете предполагалось, что основной механизм как захвата, так и термализации электронов внутри зоны проводимости и внутри двумерных подзон состоит в испускании и поглощении продольных оптических фононов. Формулы

для вероятности этих процессов были взяты из [7] и адаптированы для произвольных волновых функций начального и конечного состояния, в том числе, для двумерных подзон. Волновая функция электрона получена численным решением уравнения Шрёдингера в потенциале, включающем приповерхностный изгиб зон в полупроводнике и притяжение заряда-изображения в вакууме. Функции распределения электронов по энергии в зоне проводимости и двумерных подзонах получены численным решением стационарного уравнения Больцмана. Прозрачность границы раздела полупроводник-вакуум для электронов посчитана в приближении эффективных масс [8]. Активирующий Cs-O слой представлен в виде туннельно-прозрачного барьера, его параметры взяты из [9]. Показано, что захват электронов на состояния двумерных подзон и последующая эмиссия из этих состояний играют существенную роль по сравнению с прямой эмиссией с дна зоны проводимости в объеме полупроводника при условии резонансного захвата электронов из зоны проводимости на верхнюю подзону размерного квантования, когда дно подзоны находится на $\hbar\Omega - kT$ ниже дна зоны проводимости в объеме, где $\hbar\Omega$ – энергия продольного оптического фонона, k – постоянная Больцмана. Захват электронов в двумерную подзону приводит к значительному (в 50–150 раз) увеличению квантового выхода за счет многократных “ударов” электрона в подзоне о потенциальный барьер. Рассмотрено влияние упругого рассеяния электронов в Cs-O слое на распределение по продольной энергии для случая равномерного рассеяния электронов по азимутальному углу θ и рассеяния $\sim \cos \theta$ (аналог закона Ламберта в оптике). Распределения эмитированных электронов по продольной энергии, рассчитанные в модели эмиссии из состояний на дне зоны проводимости и в модели эмиссии из состояний двумерных подзон, сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными [2-4].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

- [1] Белл Р.Л., *Эмиттеры с отрицательным электронным средством*, Энергия, Москва (1978).
- [2] Бакин В.В. и др., *Фотоника-2023*, Новосибирск.
- [3] Орлов Д.А. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **71**, 220 (2000).
- [4] Tereshchenko O.E. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 16154 (2017).
- [5] Rameau J.D. et al., *Progr. Theor. Phys.*, **106**, 137602 (2011).
- [6] Ibach H., *Physics of surfaces and interfaces*, Springer, Berlin (2006).
- [7] Ридли Б., *Квантовые процессы в полупроводниках*, Мир, Москва (1986).
- [8] Alperovich V.L. et al., *App. Surf. Sci.*, **561**, 149987 (2021).
- [9] Vergara G. et al., *Surf. Sci.*, **436**, 83 (1999).

Вероятность выхода фотоэлектронов в вакуум из GaAs(Cs) и GaAs(Cs,O)

Хорошилов В.С., Шайблер Г.Э., Альперович В.Л.

ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поверхности p -GaAs с адсорбированными слоями цезия и кислорода широко используются в качестве источников фотоэлектронов с отрицательным электронным сродством (ОЭС), в которых уровень вакуума располагается ниже дна зоны проводимости в объеме полупроводника [1]. При этом величина квантового выхода эмиссии определяется не только эффективным электронным сродством χ^* , но и вероятностью выхода в вакуум P , т.е. «прозрачностью» эмитирующей поверхности для фотоэлектронов. Изучение эволюции электронного сродства χ^* и вероятности выхода электронов P при нанесении цезия и кислорода на поверхность p -GaAs проводилось ранее методом спектроскопии квантового выхода фотоэмиссии [2,3]. Было показано, что вероятность выхода P меняется сложным образом и ее поведение обусловлено, прежде всего, зависимостью P от энергии эмитируемых электронов и, как следствие, от электронного сродства χ^* . При этом полученная в эксперименте зависимость $P(\chi^*)$ оказалась неоднозначной. В частности, при нанесении цезия на поверхность p -GaAs был обнаружен гистерезис зависимости $P(\chi^*)$: значения P в области Cs покрытий $\theta > 0.5$ ML (монослоя) оказались меньше, чем при таких же χ^* в области $\theta < 0.5$ ML [2]. Было установлено также, что при нанесении избыточного цезия или кислорода на поверхность p -GaAs(Cs,O) в состоянии ОЭС, зависимость $P(\chi^*)$ при цезировании лежит ниже зависимости при экспонировании в кислороде [3]. Эти результаты свидетельствуют о наличии некоторого цезий-индуцированного механизма снижения вероятности выхода фотоэлектронов в вакуум P .

Целью данной работы было изучение вероятности выхода электронов при нанесении цезия на поверхности p -GaAs(Cs) и p -GaAs(Cs,O) методом измерения энергетических распределений эмитированных электронов [4]. Преимуществом данного метода является возможность исследовать эмиссию электронов разных энергий, в отличие от ранее проводившихся измерений интегрального тока фотоэмиссии электронов всех энергий [2,3]. Как следствие, измерение энергораспределений позволило разделить вклады электронного сродства χ^* и вероятности выхода P в эволюцию квантового выхода фотоэмиссии в состоянии с ОЭС, что методом спектроскопии интегрального квантового выхода сделать невозможно. Методика приготовления атомарно-чистой поверхности описана в [5]. В эксперименте были измерены распределения эмитированных фотоэлектронов по продольной компоненте энергии в ходе релаксации слоев цезия, нанесенных на чистую поверхность p -GaAs(001), а также на поверхность p -GaAs(Cs,O) с ОЭС.

На поверхности p -GaAs(Cs,O) нанесение избыточного цезия привело к снижению вероятности выхода электронов P . В ходе последующей релаксации покрытия, обусловленной частичной десорбцией цезия и структурной перестройкой адсорбционного слоя, наблюдался рост вероятности выхода P . На поверхности p -GaAs(Cs) релаксационный рост вероятности выхода P наблюдался после нанесения больших цезиевых покрытий $\theta > 0.5$ ML. При меньших цезиевых покрытиях снижение вероятности выхода P не происходило. Также на обеих поверхностях наблюдались релаксационные изменения электронного сродства χ^* , направление которых определялось исходным состоянием поверхности. Вероятной причиной цезий-индуцированных изменений вероятности выхода P является отражение и рассеяние эмитируемых электронов на двумерных "металлических" цезиевых кластерах, которые формируются на поверхностях p -GaAs(Cs) [5] и p -GaAs(Cs,O) [6] при больших цезиевых покрытиях и частично распадаются в ходе релаксации в адсорбционном слое.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

- [1] Белл Р.Л., *Эмиттеры с отрицательным электронным сродством*, М.: Энергия (1978).
- [2] Zhuravlev A.G., Alperovich V.L., *Appl. Surf. Sci.*, **461**, 10 (2018).
- [3] Zhuravlev A.G. et al., *Appl. Surf. Sci.*, **483**, 895 (2019).
- [4] Jones L.B. et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54**, 205301 (2021).
- [5] Tereshchenko O.E. et al., *Surf. Sci.*, **507-510**, 51 (2002).
- [6] Laubschat C. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **62**, 1306 (1989).

Особенности численного моделирования NV-центра во внешнем магнитном поле

Козорез А.В.

*Институт Сильноточной Электроники, 634055, Томск, проспект Академический, 2/3
Томский Государственный Университет, 634050, Томск, ул. Ленина, 36*

NV-центр представляет собой примесно-дефектный комплекс в алмазе, электронные уровни которого испытывают тонкое расщепление на спиновые состояния, вызванное различной взаимной ориентацией их полуцелых спинов. При замене четырехвалентного атома углерода на пятивалентный азот в решетке появляется дополнительный электрон, а при образовании соседней вакансии высвобождаются еще четыре электрона. Так, три валентных электрона атома азота ковалентно связаны с ближайшими атомами углерода, два – с вакансией. Часто к этим пяти электронам, прикрепленным к центру, присоединяется шестой электрон от другого атома азота. Таким образом, центр может быть как нейтральным, так и отрицательно заряженным. Следует отметить, что только NV-форме присуще парамагнитное основное состояние центра с сильной электронной спиновой поляризацией. Энергия подуровня с нулевой энергией оказывается меньше энергий подуровней -1 и 1 на 2,87 ГГц. [1]. Всего между вакансией и соседними атомами (в том числе атомом азота) имеется 4 связи, расположенные под углом $109,5^\circ$ друг к другу [2]. Зная величину сигнала оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), можно восстановить вектор внешнего магнитного поля с учетом угла его проекции на связи с вакансией.

Работа посвящена средствам и методам моделирования спиновых состояний NV-центра, в частности зависимости корреляции проекции вектора магнитного поля на оси азот-вакансионного центра в решетке алмаза с частотами оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Для моделирования NV-центра необходимо пользоваться средой с встроенным математическим аппаратом, способным работать не только с математическими формулами, но и с элементами линейной алгебры. Наглядная часть выражается в виде графиков или трёхмерной модели. Таким образом среда должна быть пригодна для работы с двумерной и трёхмерной графикой. Среда должна быть способной обрабатывать значения с точностью по крайней мере 4 знака после запятой. Подбор среды довольно обширен, однако существуют предпочтительные среды для этой задачи. Методы моделирования включают в себя анализ используемого математического аппарата, а также геометрического представления и рабочих формул.

[1] Цуканов А.В., *Микроэлектроника*, **41** (2), 104-119 (2012).

[2] Новокрещенова Е.П., «Введение в кристаллохимию полупроводников: Учебник», Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет» (2012).

Исследование сверхструктурных изменений методом ДБОЭ при синтезе Ge на Si(100)

Кукенов О.И., Соколов А.С.

Томский государственный университет, 634050, Томск, ул. Ленина, 36

Наноструктуры играют большую роль в развитии современной нанoeлектроники. Поскольку сейчас ставятся высокие требования к качеству и параметрам структур, метод дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) особенно востребован. Метод ДБОЭ является неразрушающим и универсальным методом контроля поверхности в процессе роста [1]. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать чистые структуры с минимальным количеством дефектов.

В экспериментах при анализе эпитаксиального роста основным методом контроля является ДБОЭ. Он основывается на том, что при отражении потока высокоэнергетичных электронов от поверхности образца на люминесцентном экране формируются картины дифракции, по которым определяют морфологию поверхности [2].

При эпитаксии Ge на Si(100) в первую очередь на поверхности возникает сверхструктура $2 \times N$. Она представляется в виде объединения димеров в ряды со средней длиной N . За величиной димерного ряда сверхструктуры $2 \times N$ можно следить с помощью картин ДБОЭ (рис.1). Дифракционный параметр $1/N$, характеризующий длину димерного ряда N , определяется как отношение расстояния от «01» до « $1/N$ » к расстоянию от «01» до «00» [3].

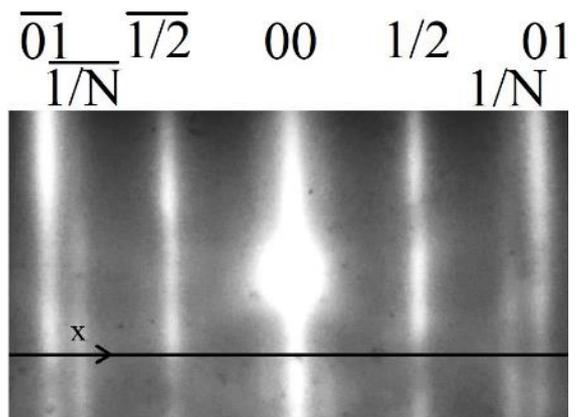


Рис.1. Картина дифракции при напылении Ge на Si(100).

В результате исследований методом ДБОЭ при молекулярно-лучевой эпитаксии германия на кремний (100), получена зависимость величины $1/N$ в температурном диапазоне 210–740 °С.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-72-10031.

[1] Mohamed A.H. et al., *Micron*, **159**, 103286 (2022).

[2] Yesin M.Y. et al., *Phys. Solid State* **64**, 609–615 (2022).

[3] Dirko V.V. et al., *Nanotechnology*, **33** (11), 1–8 (2022).

Особенности поведения СВЧ-фотопроводимости квантовых точечных контактов на основе различных AlGaAs/GaAs гетероструктур

Кузьмин Н.С.^{1,2}, Ярошевич А.С.¹, Ткаченко В.А.¹

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Квантовый точечный контакт (КТК) является одной из наиболее изучаемых систем одномерного баллистического транспорта электронов. В последнее время особенно примечателен туннельный режим КТК, когда измеряемый кондактанс много меньше кванта кондактанса $G_0 = 2e^2/h$. В данном режиме наблюдается гигантский рост кондактанса КТК при освещении структуры излучением микроволнового, терагерцового и СВЧ диапазонов [1-3].

В настоящей работе проведено экспериментальное низкотемпературное (4.2 К) изучение СВЧ-фотокондактанса в трех различных структурах с высокоподвижным двумерным электронным газом: 1) одиночный гетеропереход AlGaAs/GaAs, где слой AlGaAs легирован двумя слоями δ -Si, 2) одиночный гетеропереход AlGaAs/GaAs со сложной сверхрешетчатой структурой легирования слоя AlGaAs, 3) двойной гетеропереход AlGaAs/GaAs/AlGaAs, где слои AlGaAs легированы, как во втором случае. Было получено, что во всех трех типах структур при освещении СВЧ-излучением наблюдается гигантский фотокондактанс в туннельном режиме, а также его рост при увеличении мощности падающего излучения. Среди особенностей поведения фотокондактанса стоит выделить смену его знака: в структурах типа 2 смена знака происходит при величине порядка $0.5G_0$, в структурах типа 3 смена знака происходит при величине порядка G_0 . Для структур типа 3, в свою очередь, в одной серии измерений эффекта смены знака фотокондактанса не наблюдалось, однако, в другой серии измерений, при другом захлаживании, смена знака фотокондактанса наблюдалась при кондактансе порядка $0.25G_0$.

Результаты в структурах типа 2 и 3 согласуются с моделью прохождения электронов через колеблющийся гладкий потенциал Экарта в КТК [3]. В структурах типа 1 вышеописанное поведение объясняется различным состоянием замороженной примесной системы, которая влияет на вид потенциала двумерного электронного газа и КТК. Это также подтверждается появлением в туннельном режиме ранее отсутствующих дополнительных ступеней кондактанса и фотокондактанса КТК.

[1] Levin A.D. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 072112 (2015).

[2] Otteneder M. et al., *Phys. Rev. Appl.*, **10**, 014015 (2018).

[3] Tkachenko V.A. et al., *JETP Lett.*, **114**, 110 (2021).

Теория комбинационного рассеяния света на двумерном вигнеровском кластере

Махмудиан М.М.^{1,2}, Махмудиан М.М.^{1,2}, Энтин М.В.¹

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Рассматривается комбинационное рассеяние света (КРС) и резонансное КРС на электронах двумерного вигнеровского кластера [1,2]. Показано, что спектр КРС выражается через собственные частоты колебаний кластера, а угловые зависимости связаны с корреляционными функциями классического движения электронов в кластере. Численно найдены собственные частоты и векторы кластера, которые используются для нахождения вероятности КРС. Найден вклад вращения кластера в КРС. Показано, что из-за когерентности взаимодействия света с различными электронами кластера суммарное сечение КРС растет пропорционально квадрату числа входящих в кластер электронов, что значительно увеличивает эффект. Оценена величина эффекта и возможность его наблюдения.

[1] Mahmoodian Mehrdad, Entin M.V., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2227**, 012012 (2022).

[2] Махмудиан М.М., Махмудиан Мехрдад М., Энтин М.В., *Письма в ЖЭТФ*, **115** (10), 642–649 (2022).

Электронная структура PbSnTe:In с составами вблизи точки инверсии зон

Микаева А.С.^{1,2}, Голяшов В.А.^{1,2}, Тарасов А.С.¹, Ищенко Д.В.¹,
Супрун С.П.¹, Кавеев А.К.³, Терещенко О.Е.^{1,2}

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Ширина запрещенной зоны в твердых растворах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ зависит от их состава [1]. $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ обладает сильным спин-орбитальным взаимодействием, которое приводит к инверсии зон, и образуется фаза трехмерного топологического изолятора. Топологические поверхностные состояния имеют дираковский закон дисперсии с точкой Дирака в точках проекции L-точек объемной зоны Бриллюэна на плоскости (001), (110) и (111) и топологически защищены зеркальной симметрией. Поэтому $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ называют топологическим кристаллическим изолятором (ТКИ). Соединение свинец-олово-теллур вызывает интерес для создания устройств спинтроники. При этом объемной концентрацией носителей в этом материале можно в некотором пределе управлять путем легирования индием. Однако особенности энергетической структуры реальных поверхностей $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ изучены слабо. Целью данной работы является изучение влияния состава x , содержания индия и температуры на электронную структуру поверхности (111) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$.

Исследуемые в данной работе пленки были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках BaF_2 . Для изучения электронной структуры пленок (111) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) необходимо иметь атомарно-чистую и структурно-упорядоченную поверхность. Для ее получения пленки подготавливались путем химической обработки в HCl -изопропанол и последующего отжига в сверхвысоком вакууме при $T = 300^\circ\text{C}$ [2]. Для получения проводящего слоя на диэлектрической подложке в условиях сверхвысокого вакуума на поверхность образца осаждалось олово, которое при отжиге ($T = 300^\circ\text{C}$) диффундирует в объем пленки.

Для пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с составом $x > 0.19$ при $T = 80\text{ K}$ в Γ -точке поверхностной зоны Бриллюэна в спектрах ФЭСУР наблюдались два типа состояний: с квазипараболическим и квазилинейным законами дисперсий. Показано, что состояния с квазипараболическим законом дисперсии являются объемными, в то время как состояния с квазилинейным законом дисперсии –поверхностными. При изучении спиновой поляризации двумерных состояний было обнаружено, что они обладают геликоидальной спиновой структурой, что подтверждает, что наблюдаемые состояния являются поверхностными состояниями топологического кристаллического изолятора. Также в ходе данной работы было обнаружено, что при

температуре 80 К поверхностные состояния в Γ -точке зоны Бриллюэна появляются при изменении состава от $x = 0.16$ к $x = 0.19$.

Было обнаружено, что после длительного отжига пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ в сверхвысоком вакууме на поверхности наблюдается повышенная концентрация индия (порядка 15%). При этом на исходно нереконструированной (1×1) поверхности возникает реконструкция (7×7). При изучении электронной структуры на поверхности, обогащенной индием, наблюдалась дисперсия состояний валентной зоны, схожая со спектром состояний InTe [3].

Кроме того, была подтверждена возможность получения тонких проводящих ТКИ слоев $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с $x > 0.35$ на виртуальных диэлектрических подложках $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}/\text{BaF}_2$ путем осаждения и диффузии в объем таких пленок металлического олова. В магнитосопротивлении таких структур при температуре 4.2 К проявляются особенности, которые могут свидетельствовать о переходе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ в фазу ТКИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Приоритет-2030.

[1] Volobuev V.V. et al., *Adv. Mat.*, **29** (2017).

[2] Tarasov A.S. et al., *Appl. Surf. Sci.*, **569**, 150930 (2021).

[3] Matetskiy A.V. et al., *Phys. Rev. B* **106**, 165301 (2022).

Гальваномеханические эффекты в гексагональных дираковских 2D монослойных материалах

Снегирев А.В.^{1,2}, Ковалев В.М.^{1,3}, Энтин М.В.¹

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ Новосибирский государственный технический университет, 630072, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) – относительно новый класс соединений, который привлёк большое внимание исследователей во многом благодаря своим уникальным оптическим и транспортным свойствам. Эти свойства обусловлены их необычной зонной структурой содержащей пары электронных и дырочных долин. В результате, у носителей заряда появляется дополнительная, долинная степень свободы. Оптическое возбуждение циркулярно-поляризованным светом может приводить к неравновесному заселению долин.

Данная работа посвящена теоретическому описанию транспортных свойств монослоёв ДПМ, подвергнутых слабой однородной деформации и облучению циркулярно-поляризованным светом. Деформация нарушает тригональную симметрию решетки, вследствие чего может возникать фотогальванический ток (ФГЭ). В работе показано, что в первом порядке малости по деформации, электрический ток возникает благодаря междолинному рассеянию электронов.

В первой части работы рассматривается образец ДПМ р-типа (случай n-типа рассматривается аналогичным образом) при нулевой температуре, с уровнем Ферми, находящимся внутри валентной зоны. В этом случае количество равновесных свободных дырок намного превышает число фотогенерированных электронов, в результате теория ФГЭ может быть построена итерационным образом по амплитуде процесса междолинного рассеяния в поле однородной деформации, и в рамках линейной теории рекомбинации, когда рекомбинационное время определяется плотностью равновесных дырок. Показано, что ФГЭ ток линейно зависит от частоты облучающего света.

Во второй части работы рассмотрен образец ДПМ с уровнем Ферми, лежащем внутри запрещенной зоны. В этом случае при межзонном фотовозбуждении неравновесных носителей, концентрации неравновесных электронов и дырок сравнимы и теория ФГЭ тока строится в рамках нелинейной теории рекомбинации и итерационным образом по анизотропной части вероятности междолинного рассеяния, обусловленной однородной деформацией образца. Для упрощения вычислений было сделано предположение о быстрой энергетической и импульсной релаксации фотогенерированных носителей заряда, благодаря чему изотропные части функций распределения носителей заряда были заменены на квазиравновесные функции распределения Больцмана. Характер зависимости тока от частоты в этом случае зависит от соотношения скоростей генерации и междолинного рассеяния.

Полученные эффекты имеют долинный характер и чувствительны к поляризации облучающего излучения. Результаты данной работы будут полезны для лучшего понимания физики деформируемых двумерных материалов, а также для проектирования оптоэлектронных приборов.

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Особенности изменений картин дифракции при гомоэпитаксиальном росте Si на Si(100)

Соколов А.С., Кукенов О.И.

Томский государственный университет, 634050, Томск, ул. Ленина, 36

Поверхностные процессы при синтезе наноструктур являются важной областью исследований в нанoeлектронике. Качество структур должно отвечать жёстким требованиям современного рынка, поэтому так важно улучшать понимание о поверхности при их создании. Метод дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) является неразрушающим методом контроля поверхности в процессе роста и используется учёными по всему миру. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет получать чистые структуры с минимальным количеством дефектов.

По методу ДБОЭ в результате отражения высокоэнергетичных электронов под малым скользящим углом от исследуемого образца на люминесцентном экране формируются картины дифракции.

Зависимость интенсивности центрального рефлекса дифракционных картин роста Si на Si(100) в направлении [110] от времени представляется в виде бимодальных осцилляций, при которых у максимумов наблюдается чередование интенсивности и периода колебаний [1]. Установлено, что температура роста влияет на характер осцилляций.

В результате исследования методом ДБОЭ при молекулярно-лучевой эпитаксии кремния на кремний (100) в направлении [110], получены зависимости отношения величины больших максимумов к меньшим и отношения больших периодов к меньшим от температуры в диапазоне 200–550 °С; а также зависимость отношения интенсивности рефлексов 2x1 к 1x2 от температуры (200–800°С).

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.0.6.2022 ЛМУ.

[1] Voigtländer B., *Surf. Sci. Rep.*, **43** (5-8), 127–254 (2001).

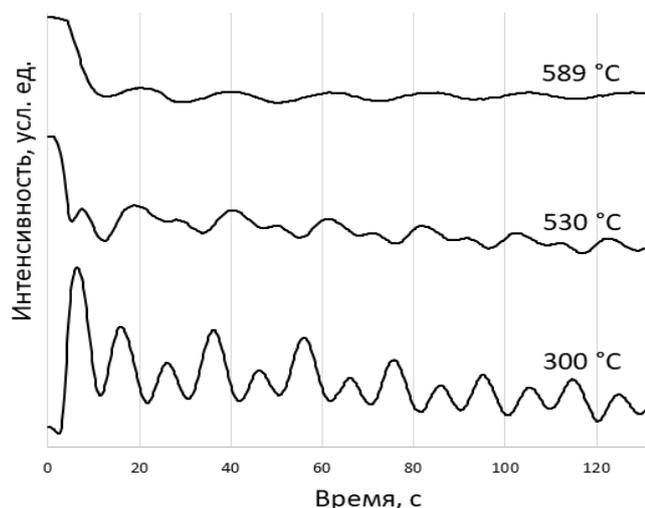


Рис.1. Характер осцилляций интенсивности рефлекса 00 от времени при разных температурах.

Электронная и кристаллическая структура тонких плёнок $\text{Bi/InAs}(111)\text{A}(2\times 2)$

Соловова Н.Ю.^{1,2}, Голяшов В.А.^{1,2}, Усачёв Д.Ю.³, Терещенко О.Е.^{1,2}

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 30

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7-9

Изучение различных соединений на основе висмута и его тонких пленок привлекает внимание, поскольку висмут обладает рядом интересных свойств. Например, висмут обладает большим спин-орбитальным взаимодействием и относится к топологическим изоляторам высокого порядка. Добавление висмута в полупроводниковые соединения A_3B_5 позволяет снизить чувствительность ширины запрещённой зоны от температуры. Отличительной особенностью InAs , выделяющей его среди других полупроводников A_3B_5 , является формирование двумерного электронного газа на его поверхностях. Для спинтроники интерес представляет усиление спин-орбитального взаимодействия в двумерном электронном газе InAs за счёт внесения атомов висмута. Данная работа посвящена изучению электронной и кристаллической структуры тонких плёнок Bi на поверхности $n\text{-InAs}(111)\text{A}(2\times 2)$.

Висмут осаждался на поверхность $\text{InAs}(111)\text{A}(2\times 2)$ из эффузионной ячейки Кнудсена в сверхвысоком вакууме $\sim 10^{-10}$ мбар. со скоростью $0,25 - 1,2$ Å/мин при комнатной температуре. Толщина выращенных плёнок Bi калибровалась по измерениям *in situ* рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Электронная структура изучалась с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР).

В ходе работы было показано, что электронная и кристаллическая структура плёнок $\text{Bi/InAs}(111)\text{A}$ зависит от их толщины. До толщин ~ 6 Å в картине дифракции медленных электронов (ДМЭ) сохраняется реконструкция (2×2) . Электронная структура близка к электронной структуре чистой поверхности $\text{InAs}(111)\text{A}$. Сохраняются состояния двумерного электронного газа. Однако, наблюдаемая ширина запрещённой зоны уменьшается от $0,6$ эВ до $0,3$ эВ. А эффективная масса легких дырок увеличивается в ~ 3 раза. Состояния тяжелых дырок перестают разрешаться. Данные РФЭС указывают на формирование при этих толщинах переходного слоя, кристаллическая структура которого была изучена с помощью рентгеновской фотоэлектронной дифракции.

При увеличении толщины плёнки начинает формироваться электронная структура, характерная для поверхности $\text{Bi}(111)$. В Γ -М направлении хорошо различаются электронный и дырочный карманы, пересекающие уровень Ферми, что говорит о полуметаллическом характере плёнок. В картине ДМЭ формируются ореолы вблизи рефлексов (1×1) , также указывающие на формирование

псевдоморфных слоев висмута со структурой $\text{Bi}(111)$. Раздвоение данных рефлексов на толщинах $\sim 30 \text{ \AA}$ говорит о релаксации напряжений.

При толщинах $\sim 25 \text{ \AA}$ и более в картине ДМЭ наблюдаются рефлексы, появление которых ранее объясняли формированием на поверхности доменов соединения InBi . Однако, наблюдавшиеся в работе [1] электронные состояния InBi на такой поверхности нами не наблюдались. Дополнительные эксперименты по осаждению In на поверхность толстых плёнок $\text{Bi/InAs}(111)\text{A}$ также не подтвердили формирование доменов InBi .

Работа выполнена при поддержке финансовой программы Приоритет-2030.

[1] *Nicolaï L. et al., preprint arXiv:1806.03061 (2018).*

Фотопроводимость графена на кремниевой подложке

Сорокин Д.В., Смовж Д.В.

ИТ СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Фотодетекция играет существенную роль в современном обществе, начиная с практических аспектов, таких как получение изображений, устройства связи и заканчивая фундаментальными научными приложениями, такими как наблюдение за Вселенной [1]. Применение графена в качестве фотоприёмника имеет высокую ценность, поскольку из-за отсутствия запрещённой зоны нарушается длинноволновый предел чувствительности к фотонам, с энергией меньшей, запрещённой зоны. Например, фотоприемники на основе кремния ограничены длиной волны около 900 нм из-за его запрещённой зоны 1,4 эВ. Кроме того, однослойный графен демонстрирует высокий коэффициент оптического поглощения $7 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ в широком диапазоне от 300 до 2500 нм, что намного выше, чем у обычных полупроводниковых материалов [2]. Эти превосходные оптические свойства открывают многообещающие перспективы использования графена в различных оптических устройствах, таких как светодиоды, солнечные элементы, фотокатализаторы, биосенсоры и фотоприемники.

Данная работа посвящена исследованию изменения сопротивления графена при облучении светодиодами с различной длиной волны. Эксперименты проводились на графене, синтез методом химического осаждения из газовой фазы которого подробно описан в работе [3]. Токопроводящие контакты создавались с помощью магнетронного напыления и состояли из нанометрового слоя титана и слоя меди. В результате облучения графеновой структуры обнаружена зависимость изменения сопротивления от длины волны фотонов и от величины интенсивности света.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант № 23-29-10130), и соглашения Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области (соглашение № р-62).

[1] *Konstantatos G. et al., Nature nanotechnology, 6, 391 (2010).*

[2] *Bonaccorso F. et al., Nature photonics, 4, 611 (2010).*

[3] *Kostogrud I. et al., Materials Chemistry and Physics, 219, 67 (2018).*

Упорядоченные GeSi квантовые точки, встроенные в дисковые резонаторы

Рудева Я.С.¹, Смагина Ж.В.², Зиновьев В.А.², Степихова М.В.³,
Родякина Е.Е.²

¹ Новосибирский государственный технический университет, 630024, Новосибирск,
пр. Карла Маркса, 20

² ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13

³ ИФМ РАН, 603087, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афоново,
ул. Академическая, д. 7

Массивы пространственно-упорядоченных полупроводниковых наноостровков (квантовых точек) считаются перспективными объектами для создания на их основе приборов нового поколения. Квантовые точки (КТ) являются ключевым элементом во многих уникальных приборных приложениях электроники и оптоэлектроники, таких как квантовый компьютер, однофотонные излучатели и детекторы [1]. Для их практической реализации требуется формирование упорядоченных структур с прецизионным расположением КТ в пространстве и заданным взаимодействием между носителями заряда, локализованными в соседних КТ. Дополнительным преимуществом упорядоченных КТ является уменьшение разброса по размерам и увеличение однородности состава [2]. Один из наиболее перспективных методов точного позиционирования КТ – это формирование КТ в процессе гетероэпитаксии на поверхности с предварительно созданными центрами зарождения КТ, например, в виде ямок. Варьируя геометрические параметры ямки (диаметр, глубина, наклон боковых стенок, форма дна) и период их расположения, можно получить КТ различной формы, плотности и расположения на поверхности [3]. За счет прецизионного встраивания КТ в различные резонаторы и фотонные кристаллы можно увеличить их излучательную способность [4-6]. В данной работе представлены результаты по самоорганизации упорядоченных групп Ge(Si) КТ на структурированной поверхности, размещению КТ внутри кремниевых дисковых резонаторов и исследованию их излучательных свойств.

На первом этапе, с помощью электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления на подложке Si создавался разреженный массив ямок, имеющих круглую форму, периодически расположенных на расстоянии от 0.5 мкм до 6 мкм относительно друг друга. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на структурированную поверхность осаждали слой Ge толщиной, достаточной для зарождения наноостровков в ямках (~ 4 монослоя (МС)), но меньшей чем критическая толщина зарождения островков на плоской поверхности. Установлены зависимости пространственного расположения германиевых КТ от формы ямок, их глубины и периода расположения на подложке. Определены оптимальная форма ямок и расстояние между ними, обеспечивающие зарождение как одиночных КТ внутри ямок (рис. 1, а), так и группы КТ, обрамляющих ямку (рис. 1, б).

Выявлены условия воспроизводимого роста многослойных структур с заданным расположением КТ. Структурные и оптические свойства полученных упорядоченных массивов КТ исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и микро-фотолюминесценции. На втором этапе, с помощью электронно-лучевой литографии проводилось позиционирование КТ относительно центров дисков будущих резонаторов. КТ размещались в трёх точках: в центре диска, ближе к краю диска и в промежуточном положении. Радиус дисков (отверстий в маске резиста) варьировался в диапазоне от 500 до 750 нм с шагом 100 нм. Далее, поверх маски с отверстиями методом магнетронного напыления осаждался тонкий слой хрома. После удаления резиста на поверхности многослойной структуры с GeSi КТ были получены периодические массивы дисков из хрома, которые служили маской для формирования резонаторов с помощью метода плазмохимического травления. Таким образом, были получены периодические массивы резонаторов в виде кремниевых нанодисков. Исследования люминесцентных свойств структур показали, что в спектрах ФЛ наблюдается хорошо выраженные узкие пики, которые, по-видимому, связаны с высокодобротными излучательными модами дисковых резонаторов, типа моды шепчущей галереи. Так же исследования показали, что сигнал ФЛ зависит от места расположения КТ в резонаторе. Наблюдается увеличение интенсивности ФЛ примерно в 2 раза при смещении КТ от центра к краю диска резонатора.

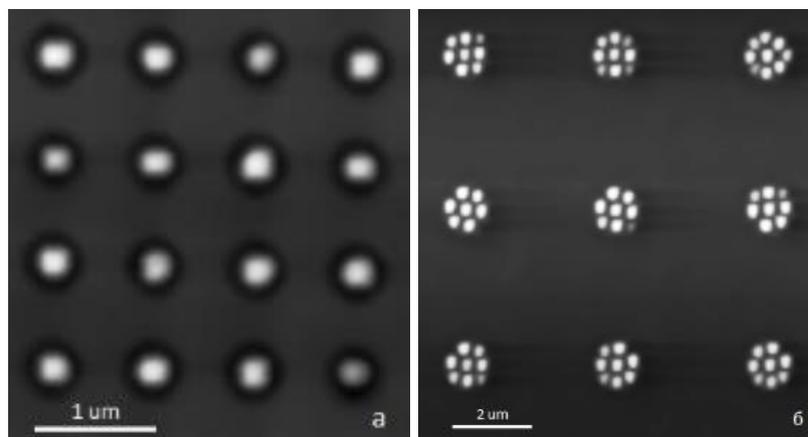


Рис.1. АСМ изображения КТ на поверхности гетероструктуры Ge(Si): а – зарождение одиночных КТ внутри ямок; б – зарождение группы КТ, обрамляющих ямку.

Работа финансировалась из средств гранта РФФИ № 21-72-20184.

- [1] Schatzl M. et al., *ASC Photonics*, **4** (3), 665 (2017).
- [2] Beirne G.J. et al., *Phys. Rev. Lett*, **96**, 137401 (2006).
- [3] Rudin S.A. et al., *J.Appl.Phys.* **131**, 035302 (2022).
- [4] Смагина Ж.В. и др., *ФТП*, **54** (8), 708-715 (2020).
- [5] Rutckaia V. et al., *J. Schilling. Nano Lett.*, **17**, 6886 (2017).
- [6] Brehm M. et al., *Nanotechnology*, **26**, 225202 (2015).

Авторский указатель

Альперович В.Л.	22, 24	Родякина Е.Е.	15, 38
Антонова И.В.	15	Рудева Я.С.	38
Баженов А.О.	20	Рябцев И.И.	11
Бакин В.В.	22	Семенова О.И.	15
Басалаева Л.С.	15	Ситников С.В.	15
Бетеров И.И.	11	Смагина Ж.В.	38
Голяшов В.А.	22, 30, 35	Смовж Д.В.	37
Гутаковский А.К.	15	Снегирев А.В.	32
Зиновьев В.А.	38	Соколов А.С.	27, 34
Исламов Д.Р.	7	Соловова Н.Ю.	35
Ищенко Д.В.	20, 30	Сорокин Д.В.	37
Кавеев А.К.	30	Степина Н.П.	20
Казанцев Д.М.	22	Степихова М.В.	38
Кириенко В.В.	20	Супрун С.П.	30
Ковалев В.М.	32	Тарасенко С.А.	14
Козорез А.В.	26	Тарасов А.С.	30
Кузьмин Н.С.	28	Терещенко О.Е.	20, 22, 30, 35
Кукенов О.И.	27, 34	Ткаченко В.А.	17, 28
Курусъ Н.Н.	15	Третьяков Д.Б.	11
Латышев А.В.	15	Усачёв Д.Ю.	35
Махмудиан М.М.	29	Федина Л.И.	15
Махмудиан Мехрдад М.	29	Хорошилов В.С.	24
Микаева А.С.	30	Чистохин И.Б.	11
Милёхин А.Г.	15	Шайблер Г.Э.	22, 24
Милёхин И.А.	15	Шкляев А.А.	12
Михайлов Н.Н.	9	Шумилин А.В.	20
Насимов Д.А.	15	Щеглов Д.В.	15
Небогатикова Н.А.	15	Энтин В.М.	11
Неизвестный И.Г.	11	Энтин М.В.	29, 32
Преображенский В.В.	11	Якшина Е.А.	11
Рогило Д.И.	15	Ярошевич А.С.	28
Родякин С.В.	15		