

**Материалы секции**  
**ФИЗИКА**  
**ТВЕРДОГО ТЕЛА**



14-19 апреля 2019  
НОВОСИБИРСК



НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МНСК-2019

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Материалы  
57-й Международной научной студенческой конференции

14–19 апреля 2019 г.

Новосибирск  
2019

УДК 53  
ББК 22.379я431  
Ф 50

Научный руководитель секции –  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Латышев

Председатель секции – д-р физ.-мат. наук, проф. В. Л. Альперович

Ответственный секретарь секции – А. А. Добрецова

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук В. Л. Альперович  
д-р физ.-мат. наук З. Д. Квон  
канд. физ.-мат. наук Л. С. Брагинский  
канд. физ.-мат. наук Е. Е. Родякина  
канд. физ.-мат. наук Д. Р. Исламов

Ф 50 Физика твердого тела : Материалы 57-й Междунар. науч. студ.  
конф. 14–19 апреля 2019 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ  
НГУ, 2019. – 40 с.

ISBN 978-5-4437-0863-8

**УДК 53**  
**ББК 22.379я431**

ISBN 978-5-4437-0863-8

© СО РАН, 2019  
© Новосибирский государственный  
университет, 2019

NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ISSC-2019

SOLID STATE PHYSICS

Proceedings  
of the 57<sup>th</sup> International Students Scientific Conference

April, 14–19, 2019

Novosibirsk  
2019

УДК 53  
ББК 22.379я431  
Ф 50

Section scientific supervisor – Ac. of the RAS, Dr. Phys. Math., Prof.  
A. V. Latyshev

Section head – Dr. Phys. Math., Prof. V. L. Alperovich

Section responsible secretary – A. A. Dobretsova

Section scientific committee  
Dr. Phys. Math. V. L. Alperovich  
Dr. Phys. Math. Z. D. Kvon  
Cand. Phys. Math. L. S. Braginsky  
Cand. Phys. Math. E. E. Rodyakina  
Cand. Phys. Math. D. R. Islamov

**Ф 50** Solid State Physics: Proceedings of the 57<sup>th</sup> International Students  
Scientific Conference. April, 14–19, 2019 / Novosibirsk State University. –  
Novosibirsk : IPC NSU, 2019. – 40 p.

ISBN 978-5-4437-0863-8

**УДК 53**  
**ББК 22.379я431**

ISBN 978-5-4437-0863-8

© SB RAS, 2019  
© Novosibirsk State University, 2019

**Взаимодействие атомов иттрия с фуллеренами  
на поверхности Si(111)- $\alpha\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au**

С. В. Бондаренко

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

В настоящее время значительный интерес представляют альтернативные виды топлива, методы их получения, хранения и транспортировки. Водород считается одним из перспективных альтернативных энергоносителей, разработка наиболее экономичных и эффективных способов хранения водорода представляет собой одну из главных технологических проблем водородной энергетики. Наиболее безопасным методом считается хранение водорода в абсорбированном состоянии. Многие наноматериалы, такие как углеродные нанотрубки, фуллерены, наноструктуры на основе бора и азота, металлические органические каркасные структуры, интенсивно исследовались для хранения водорода. В работе, выполненной китайскими учеными Зи-Янь Тянь и Шун-Ле Донг из отдела физики Океанского университета, было показано, что добавление атомов переходного металла (иттрия) на поверхность молекулы фуллерена  $C_{60}$  может вызвать заметное усиление адсорбционной способности водорода [1]. Основным преимуществом этой системы является то, что она адсорбирует 12 молекул  $H_2$  и все связи являются молекулярными, в такой системе может быть достигнута 100 % десорбция молекул водорода, что невозможно достичь в ранее изученных системах металл – фуллерен, где первая молекула водорода диссоциировала на атоме переходного металла, расположенного на фуллерене.

Целью моей работы было исследовать взаимодействие атомов иттрия с фуллеренами на поверхности Si(111)- $\alpha\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au. Формирование поверхности Si(111)- $\alpha\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au происходит путем осаждения золота на Si(111). В результате чего формируется реконструкция Si(111)- $\alpha\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au. На полученную фазу при комнатной температуре напылялось 2 монослоя фуллеренов  $C_{60}$ . Фуллерены собираются вдоль ступеней террас, и от них образуют двухмерные плотно упакованные массивы. После формирования  $C_{60}/Si(111)-\alpha\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au происходит импульсное осаждение иттрия (Y) 10, 20, 40 и 60 секунд.

---

1. Zi-Ya Tian, Shun-Le Dong // The Journal of Chemical Physics. 2014. V. 140. № 4. URL: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/journal-chemical-physics/journal-chemical-physics-2014-v.140-n-4/14042014.pdf>

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Олянич

## Структурные, электронные и оптические свойства тонких пленок $\text{MoS}_2$ , синтезированных методом CVD

Е. Ф. Боякинов, Е. И. Захаркина, А. А. Семенова, П. В. Винокуров  
Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск

После открытия графена и его уникальных свойств интерес к другим двумерным материалам значительно возрос. Несмотря на малый вес двумерных материалов и их высокую оптическую прозрачность, класс дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), в частности дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), открывает возможности в создании новых оптоэлектронных устройств [1]. В зависимости от химического состава, структурной конфигурации и толщины, атомно-тонкие материалы могут иметь металлические, полуметаллические, полупроводниковые, диэлектрические, топологические и сверхпроводящие свойства. ДПМ имеют диапазон значений ширины запрещенной зоны, покрывающий видимый и инфракрасный диапазоны. В сравнении с многослойным  $\text{MoS}_2$  в его однослойном аналоге характерен переход из непрямозонного объемного полупроводника в прямозонный, в результате которого усиливаются фотолюминесцентные свойства.

В работе получены пленки  $\text{MoS}_2$ , произведенные методом осаждения из газовой фазы (CVD) на  $\text{SiO}_2$  и сапфире. Расчет методом теории плотности функционала показал, что компоновка 2H для одного слоя  $\text{MoS}_2$  соответствует прямозонному полупроводнику с шириной запрещенной зоны около 1.8 эВ. Растровая электронная (РЭМ) и оптическая микроскопии подтвердили рост монокристаллических доменов  $\text{MoS}_2$  с латеральными размерами до 80 мкм при синтезе на  $\text{SiO}_2$  и до 240 мкм на сапфире. Толщина доменов  $\text{MoS}_2$  определена с помощью атомно-силовой микроскопии: в диапазоне 0.8–0.9 нм. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия подтвердила содержание молибдена и серы в образце  $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2$ : молибден (0,19 ат. %), сера (0,48 ат. %). На освещенном участке пленки  $\text{MoS}_2$  наблюдается электрический отклик до  $-1,2$  мкА при 2В. Планируется проведение расчетов  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoS}_2\text{WS}_2$  в комбинации с графеном; исследование структурных, электронных и оптических свойств гетероструктур на основе двумерных ДПМ ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ) и графена.

---

1. *Novoselov K. S. et al.* 2D materials and van der Waals heterostructures // Science. 2016. V. 353. №. 6298. P. 9439.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук Ю. М. Григорьев,  
канд. физ.-мат. наук Е. П. Шарин

**Оптоэлектронный сенсор  
для определения концентрации водорода в окружающей среде**

Л. К. Власов<sup>1,2</sup>, Е. А. Гребенщикова<sup>2</sup>, В. А. Шутаев<sup>2</sup>,  
В. Г. Сидоров<sup>3</sup>, Ю. П. Яковлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> ООО АИБИ, Санкт-Петербург

Использование водородного топлива в энергетике является одним из альтернативных решений проблемы защиты окружающей среды. Однако высокая взрывоопасность при относительно небольших концентрациях водорода ставит на первый план проблему необходимости разработки систем мониторинга возможных утечек при хранении и использовании водорода.

Целью нашей работы является исследование влияния концентрации водорода на электрические и фотоэлектрические свойства МОП-структур Pd/Oxide/InP и использование их в качестве чувствительного элемента в сенсоре для определения концентрации водорода в окружающей среде.

Структуры изготавливались следующим образом: на подложке *n*-InP с концентрацией электронов  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  методом электрохимического окисления выращивался слой оксида толщиной  $\sim 100 \text{ нм}$ , затем на его поверхности методом термовакuumного напыления формировался слой Pd толщиной 20–40 нм. На поверхности палладия создавался омический контакт из Au. Для снижения токов утечки слой оксида и палладия по периметру ограничивались слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . На обратной стороне подложки формировался омический контакт Cr/AuGe/Au.

Были получены и исследованы вольт-амперные характеристики в интервале температур 90–300 К. На основе проведенных измерений были определены механизмы токопрохождения в вакууме и в атмосфере водорода. Фотоэлектрические свойства структур исследованы в воздушной среде и в среде азотно-водородной смеси с концентрациями водорода 0,1, 1, 4 объемных %. Эксперимент показал, что с увеличением концентрации водорода в газовой смеси увеличивается скорость спада фотоЭДС. Причем зависимость скорости спада фотоЭДС от концентрации водорода носит экспоненциальный характер. Отсюда следует, что по скорости спада фотоЭДС можно количественно определять концентрацию водорода в окружающей среде.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук Е. А. Гребенщикова;  
д-р физ.-мат. наук В. Г. Сидоров, д-р физ.-мат. наук Ю. П. Яковлев,  
В. А. Шутаев

## Исследование причин самоупрочнения марганцовистых сталей

С. С. Герг<sup>1</sup>, Л. И. Квеглис<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский государственный университет  
им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

Несмотря на многочисленные исследования причин самоупрочнения марганцовистых сталей, используемых в производстве изделий для нужд железнодорожного транспорта на АО «Востокмашзавод», проблема эта окончательно не решена. Цель нашей работы – выявление природы самоупрочнения марганцовистых сталей и возможность управления этим явлением. Все это важно как для производства изделий машиностроения, так и для проблем физики металлов.

В ходе исследования зависимости скорости ультразвука от балла зерна в стали 20ГЛ, замечено падение скорости ультразвука, которое не связано с размером зерна, как считается во многих работах. С целью релаксации внутренних напряжений [1], в результате которой может уменьшаться поглощение ультразвука, проведена обработка образцов воздействием импульсного тока плотностью 100 А/мм<sup>2</sup>, после чего выявлено еще более сильное поглощение ультразвука.

Исследования с помощью рентгеновской дифракции, которое проводилось после испытаний ультразвуком до обработки током и после, показало, что в сплаве стали 20ГЛ марганца содержится более чем в 2 раза больше, чем в исходном составе. Сравнивая данные, полученные в сканирующем электронном микроскопе с микроанализатором INCA Energy, можно предположить, что обработка импульсным током приводит к образованию дополнительных частиц марганца из железа.

Если ядра находятся в возбужденном состоянии, то сечение захвата нейтронов такими ядрами резко увеличивается и для прохождения реакции достаточно небольших энергий [2].

---

1. Столяров В. В. Электростимулирование пластической деформации объемных наноструктурных титановых сплавов с эффектом памяти формы. М. : ИМАШ РАН.

2. Алейник В. И., Касатов Д. А., Макаров А. Н., Таскаев С. Ю. Измерение спектра нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Л. И. Квеглис

**Проявление спиновой аккумуляции в эффекте Франца – Келдыша**

Е. А. Горбунов

Новосибирский государственный университет

В последние годы все больше внимания уделяется изучению спин-зависимых явлений в различных структурах (системы с сильным расщеплением Рашбы, тонкие магнитные пленки, топологические изоляторы и т. д.). Такие системы потенциально могут и находят применение в спинтронике. Интересной системой с точки зрения аккумуляции и детектирования спиновой поляризации электронов является структура металл – диэлектрик – полупроводник (МДП), в которой металл является ферромагнетиком, диэлектрик является туннельным, а полупроводник позволяет создавать оптическую ориентацию электронных (дырочных) спинов. Целью данной работы является изучение аккумуляции спин-поляризованных электронов в области пространственного заряда (ОПЗ) р-GaAs(001) с помощью эффекта Франца – Келдыша. В отличие от классической экспериментальной схемы измерения эффекта Франца – Келдыша, в методе спин-зависимого эффекта Франца – Келдыша модуляция встроенного электрического поля ОПЗ осуществляется изменением направления круговой поляризации луча накачки, а не его интенсивности. Эффект модуляции электрического поля ОПЗ основан на спин-зависимом туннелировании поляризованных электронов, которое, в свою очередь, зависит от оптической ориентации спинов и намагниченности ферромагнетика.

Для изучения спин-зависимого эффекта Франца – Келдыша изготовлены структуры Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs, Co/MgO/GaAs, Co/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs с различными толщинами (1–8 нм) слоя кобальта и диэлектрика с целью получить намагниченность ферромагнитного слоя с легкой осью, направленной нормально к поверхности. Намагниченность тонких ферромагнитных пленок измерялась с помощью магнитооптического эффекта Керра (МОЭК). На первом этапе измерены встроенные электрические поля исходных поверхностей р-GaAs(001) и после изготовления МДП-структур. Изучено изменение приповерхностного электрического поля после нанесения диэлектрика и ФМ. Методом МОЭК установлено, что легкая ось намагниченности большинства контактов лежит в плоскости поверхности, магнитные свойства изотропны в ней, а коэрцитивные поля составляют ~10 мТ. Приводятся оценки значения фотоЭДС, возникающего вследствие спин-зависимого эффекта Франца – Келдыша.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук О. Е. Терещенко

**Исследование микроволнового фотокондактанса  
квантовых точечных контактов**

В. А. Дутов

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Квантовые точечные контакты (КТК) являются одним из самых значимых типов структур в области мезоскопической физики. Они представляют из себя микросужения в двумерном электронном газе, образующие набор одномерных подзон между двумя его областями. Характерные значения энергии в квантовых точечных контактах, изготовленных в полупроводниковых структурах, имеют порядок мэВ, и при низких температурах ( $T \leq 1$  К) они демонстрируют явление квантования кондактанса. Интересным для таких КТК является вопрос о влиянии микроволнового излучения их на кондактанс. И в недавних работах было обнаружено, что фотокондактанс квантовых точечных контактов испытывает гигантский рост при туннельном режиме работы в области частот от 0,11 до 0,7 ТГц.

Целью данной работы является изучение указанного воздействия на кондактанс КТК в новой области частот от 1 до 3 ГГц. В работе исследуются квантовые точечные контакты с расщепленным и непрерывным металлическими затворами, изготовленные с помощью электронной литографии на основе структур с высокоподвижным двумерным электронным газом в гетеропереходах GaAs/AlGaAs. Эксперимент заключался в получении зависимостей фотокондактанса КТК от напряжения, подаваемого на его затвор. Измерения кондактанса проводились с использованием метода синхронного детектирования.

Эксперименты показывают, что в туннельном режиме фотокондактанс квантового точечного контакта превышает темновой более чем на два порядка при мощности падающего излучения порядка  $0,1$  мВт/см<sup>2</sup> в указанной области частот. Эффект начинает проявляться при облучении образца излучением очень малой мощности (порядка  $1$  мкВт/см<sup>2</sup>) и с ее увеличением растет. Таким образом, можно сделать вывод, что микроволновое излучение частотой в несколько ГГц и мощностью порядка  $0,1$  мВт/см<sup>2</sup> приводит к появлению большого фотокондактанса КТК в туннельном режиме.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук З. Д. Квон

**Электронные свойства однослойного графена,  
допированного атомами азота**

К. В. Евсеев

Северо-Восточный федеральный университет  
им. М. К. Аммосова, Якутск

Графен обладает такими физическими свойствами, как высокая подвижность носителей заряда, гигантская теплопроводность, высокая удельная площадь поверхности, механическая прочность и гибкость. Эти свойства графена делают его перспективным материалом для широкого применения в гибкой электронике, нанoeлектронике, устройствах преобразования и хранения энергии. Широкое применение графена в электронных устройствах ограничивается отсутствием запрещенной зоны. Химическая модификация графеновых слоев имеет большое значение для разработки новых материалов, поскольку не только открывает запрещенную зону, но и дает возможность управлять ее шириной. Поэтому одним из направлений исследований таких систем является химическая модификация.

Данная работа посвящена расчету зонной структуры и плотности состояний графена, допированного атомами азота в зависимости от концентрации атома азота и его относительного расположения в кристаллической решетке.

Все вычисления проводились с использованием программы Quantum Espresso. В основе лежит метод псевдопотенциала с использованием плоских волн в рамках теории функционала плотности (DFT). Влияние остовных электронов учитывалось путем использования ультрамягких псевдопотенциалов. Использовался нелокальный обменно-корреляционный функционал в параметризации Perdew – Burke – Ernzerhof (PBE). Энергия обрезания плоских волн для самосогласованного расчета составляла 40 Ry. Для интегрирования линейной зоны Бриллюэна была использована сетка 13x13x1 в обратном пространстве. Для вычисления электронной структуры монослоя использовалась изолированная плоская структура. Во избежание взаимодействия между слоями расстояние между ними устанавливалось равным 15 Å.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. П. Шарин

**Спектр энергии носителей заряда  
в квантовых ямах комбинированного профиля**

О. Ф. Задорожный, В. Н. Давыдов, О. А. Каранкевич  
Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

Подавляющее число традиционных светодиодов на основе гетероструктуры InGaN/Ga используют прямоугольные квантовые ямы (ПКЯ), что связано с простотой технологии ее получения [1]. Однако ПКЯ обладают рядом недостатков, одним из которых является нерациональное использование энергетического объема ПКЯ. Для решения данной проблемы рассматривается КЯ в виде комбинации из двух прямоугольных либо же двух треугольных КЯ, расположенных друг над другом.

Располагая широкую ПКЯ поверх узкой ПКЯ (модель ямы с «дополнительным потенциальным провалом» [2]), можно добиться более равномерного распределения энергетического спектра, что приводит к увеличению числа уровней размерного квантования, основным результатом которого является увеличение интенсивности излучения по сравнению с одиночными ПКЯ. Такая комбинация двух ПКЯ позволяет как повысить эффективность захвата носителей заряда из барьерного слоя, так и увеличить скорость излучательной рекомбинации за счет большего перекрытия волновых функции электронов и дырок в узких ямах.

Комбинация двух треугольных квантовых ям (ТКЯ) позволяет в широких пределах управлять спектром излучения путем изменения наклона верхней и нижней ТКЯ, а также повысить эффективность излучения гетероструктуры. Изменение наклона верхней и нижней КЯ может как разряжать, так и уплотнять спектр уровней энергии, а также менять положения первого состояния. Наклон нижней КЯ влияет на положения первого возбужденного состояния, тогда как наклон верхней КЯ определяет плотность спектра.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке топологий КЯ в светодиодных источниках когерентного и некогерентного излучения, изготавливаемых на основе соединений  $A^{III}N$ , обладающих большим полем спонтанной поляризации.

---

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

2. Драгунов В. П. Основы нанозлектроники. М.: Физматкнига, 2006. 496 с.

**Выявление корреляции между концентрациями нейтральных и заряженных ловушек в тонких пленках оксида гафния**

Т. М. Залялов

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

Диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью, называемые high- $\kappa$  диэлектриками, активно используются в микроэлектронике. Одним из high- $\kappa$  диэлектриков является оксид гафния  $\text{HfO}_2$ . Высокая диэлектрическая проницаемость этого материала ( $\epsilon \approx 16\text{--}40$ ) позволяет использовать его в качестве подзатворного диэлектрика в полевых транзисторах современных микропроцессоров, изготовленных по техническим нормам: 45 нм и ниже. Высокие энергетические барьеры на границе с кремнием и глубокие центры локализации заряда делают оксид гафния многообещающим кандидатом в качестве активной среды в элементах флэш-памяти. В связи с этим актуальным становится изучение накопления носителей заряда в пленках оксида гафния. В настоящей работе выявляется корреляция концентрации локализованных носителей заряда и концентрации ловушек в тонких пленках оксида гафния.

Исследовались МДП-структуры с тонкими пленками оксида гафния, выращенными на кремниевой подложке методом атомно-слоевого осаждения с использованием двух систем прекурсоров  $\text{TEMAH}+\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Hf}(\text{thd})_4+\text{O}_2$  с последующим отжигом в нейтральной атмосфере при температурах 250–700 °С. Из измеренных вольт-фарадных характеристик получены значения концентрации локализованного в диэлектрике заряда  $n_i$ . Анализ экспериментальных вольт-амперных характеристик позволил получить значения концентрации центров локализации заряда  $N$  в пленках оксида гафния.

Выявлено, что значения  $N$  зависят от условий синтеза пленок и изменяются в диапазоне  $10^{19}\text{--}10^{22}\text{ см}^{-3}$ . Сопоставление значений  $N$  и  $n_i$  показало, что максимальная концентрация локализованного в диэлектрике заряда не зависит от общего количества центров локализации. Это объясняется электрон-электронным взаимодействием с кулоновским экранированием и образованием структуры типа вигнеровского стекла.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. Р. Исламов

**Влияние изолирующего слоя диоксида кремния  
на свойства фазового перехода в тонких пленках диоксида ванадия**

К. Е. Капогузов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова

СО РАН, Новосибирск

Новосибирский государственный университет

Диоксид ванадия ( $\text{VO}_2$ ) является умным материалом, в котором при температуре  $67^\circ\text{C}$  имеет место резкий обратимый фазовый переход металл – изолятор (ФПМИ). ФПМИ влечет за собой резкое изменение электрической проводимости до пяти порядков. Известно, что ФПМИ в  $\text{VO}_2$  может быть вызван различными видами внешних воздействий, например, такими как температура, электрическое поле, свет и пр. [1]. Структуры с  $\text{VO}_2$  перспективны для применения в электрических и оптических устройствах. Однако рост высококачественных пленок  $\text{VO}_2$  является проблемой ввиду сложных многостадийных процессов, протекающих при синтезе [2]. Влияние поверхностного слоя подложки на свойства ФПМИ в тонких пленках  $\text{VO}_2$  практически не изучено.

В работе исследуются свойства ФПМИ в тонких пленках  $\text{VO}_2$  на различных подложках: Si,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Si/SiO<sub>2</sub>. Пленки  $\text{VO}_2$  были получены методом химического осаждения из газовой фазы [2]. В результате синтеза при различных температурах толщина слоя SiO<sub>2</sub> на подложках составила 150–300 нм. Измерения зависимости сопротивления от температуры проводились стандартным двухконтактным методом в диапазоне температур от 30 до  $80^\circ\text{C}$ .

Показано, что свойства ФПМИ пленок  $\text{VO}_2$  зависят от материала подложки, а также условий синтеза изолирующего слоя. Отношение сопротивлений в пленках  $\text{VO}_2$ , синтезированных при одинаковых условиях, до и после ФПМИ изменялось от 1 до 3 порядков для различных подложек. Была определена закономерность температуры ФПМИ, ширины гистерезиса и энергии активации от материала и качества поверхности подложки. Полученные результаты показывают важность качества изолирующего слоя SiO<sub>2</sub> на свойства ФПМИ в тонких пленках  $\text{VO}_2$ . Данная работа перспективна для применения  $\text{VO}_2$  в сенсорах и мотт-транзисторах.

---

1. Ke Y. et al. // Small. 2018. № 1802025.

2. Yakovkina L. V. et al. // Journal of Materials Science. 2017. V. 52 (7). P. 4061–4069.

Научный руководитель – С. В. Мутилин

**Модель захвата и эмиссии носителей заряда квантовой ямы**

О. А. Каранкевич, В. Н. Давыдов

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

При разработке приборов, содержащих квантовые ямы (КЯ), важным является вопрос о механизме взаимодействия свободных носителей заряда с КЯ. Решение этого вопроса позволит увеличить эффективность этого взаимодействия и тем самым улучшить эксплуатационные параметры приборов. Несмотря на многочисленные применения квантово-размерных эффектов в современной микро- и оптоэлектронике в научной литературе отсутствует ясное понимание физических процессов взаимодействия и их математического описания [1–3].

В данной работе приводятся результаты расчета времени захвата и времени эмиссии электронов в прямоугольной КЯ, выполненной в рамках феноменологической модели взаимодействия указанных объектов.

Расчетным путем показано [4], что в результате упругих соударений электронов с оптическими фонами межфазной границы «КЯ – барьерный слой» по каскадной схеме захват электронов происходит тем эффективнее, чем глубже уровень размерного квантования. Эффективность эмиссии электронов со стационарного состояния КЯ в барьерный слой растет по мере уменьшения глубины залегания. Однако вопрос о механизме преобразования в результате захвата электрона-корпускулы в электрон-волну остается открытым.

К решению проблемы захвата и эмиссии электронов КЯ в LED-гетероструктурах возможно несколько подходов: описание захвата/эмиссии с использованием коэффициентов Эйнштейна; применение правила Ферми для определения времен взаимодействия; представление захвата и эмиссии в рамках модели Шокли – Рида – Холла по взаимодействию глубокого уровня со свободными носителями заряда; представление электронов и фононов в рамках волнового взаимодействия, создающего стационарные состояния электронов в яме как результат интерференции захватываемого (эмитируемого) электрона-волны и оптического фона-волны.

---

1. Абакумов В. Н., Перель В. И., Ясиевич И. В. ПИЯФ, 1997. 376 с.

2. Karol Kalna SAS. 1997.

3. Bloom P. W. M. // Phys. Rev. 1992. V. 47. P. 2072.

4. Давыдов В. Н., Каранкевич О. А. ФИЗИКА 2. 2018. 61 с.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. Н. Давыдов

## Исследование термоэлектрических свойств $\text{CuCrS}_{2-y}\text{Se}_y$

И. Н. Катаманин

Новосибирский государственный технический университет

Термоэлектричество представляет собой альтернативный способ получения электроэнергии путем преобразования тепла в электричество. Такой способ имеет ряд преимуществ, а именно: экологичность, отсутствие движущихся частей и др. Одним из наиболее важных параметров является эффективность преобразования тепла в электричество. С этой точки зрения термоэлектрические материалы характеризуются параметром  $ZT = \sigma S^2 T / k$ , где  $\sigma$  – электропроводность,  $S$  – коэффициент Зеебека,  $k$  – теплопроводность. Все перечисленные параметры зависят от концентрации носителей заряда, и улучшение одного параметра приведет к ухудшению другого. Поэтому поиск новых термоэлектрических материалов остается актуальной задачей в области альтернативной энергетики.

Поликристаллические образцы  $\text{CuCrS}_{2-y}\text{Se}_y$  ( $y = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2$ ) были получены твердотельным синтезом в Ewha Womans University (Южная Корея).

На полученных образцах измерялись температурные зависимости электропроводности и коэффициента Зеебека в диапазоне температур 4.2–298 К.  $\text{CuCrS}_2$  является полупроводником р-типа с экспоненциальной температурной зависимостью электропроводности. Замещение S на Se меняет полупроводниковое поведение на металлическое. При полной замене атомов S на Se электропроводность увеличилась в 1000 раз. При этом коэффициент Зеебека уменьшился в 2 раза. Таким образом, используя фактор мощности  $PF = S^2 \sigma$  для сравнения полученных результатов, было установлено, что наилучшей термоэлектрической эффективностью обладает образец  $\text{CuCrSe}_2$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-503-51017) и National Research Foundation of Korea (NRF-2015R1A5A1036133 and NRF-2017K2A9A1A06051881).

Выражаем благодарность за синтез образцов Prof. S.-J. Kim и Prof. M.-K. Han.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. И. Романенко

**Синтез эпитаксиальных слоев InAlAs  
на подложке (001)InP методом МЛЭ**

Д. А. Колосовский, Д. В. Дмитриев  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) InAlAs/InP, согласованные по параметрам кристаллической решетки, применяются в современных оптоэлектронных и СВЧ-приборах: СВЧ-транзисторы, квантово-каскадные лазеры, мощные СВЧ-фотодиоды и электрооптические модуляторы. Применение молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для изготовления гетероструктур позволяет получать резкие гетерограницы и точно управлять потоками поступающих на поверхность компонентов. В литературе встречаются различные данные по МЛЭ ГЭС InAlAs/InP. В некоторых работах авторы указывают оптимальную температуру роста 530 °С, тогда как есть работа, где авторы получили наилучшие структурные характеристики при 600 °С. Установлено, что структурные характеристики выращенных слоев влияют на характеристики приборов [1]. Работа направлена на отработку технологии роста и исследовательские структурных характеристик ГЭС InAlAs/InP.

Эпитаксиальный рост тройного твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  проводился на установке Riber Compact-21T в широком диапазоне условий роста. Температура роста варьировалась от 480 до 600 °С. При этом поток мышьяка изменялся от  $10^{-6}$  до  $10^{-5}$  Торр. Потоки алюминия и индия подбирались для получения состава  $X = 0.52$ , так как слои  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  являются решеточно-согласованными с подложкой InP. Исследование морфологии поверхности проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Методом фотолюминесценции осуществлялся контроль состава твердого раствора.

Наилучшие структурные характеристики ГЭС InAlAs/InP наблюдаются при температуре роста 500–505 °С и потоке мышьяка порядка  $3 \times 10^{-5}$  Торр. На АСМ-изображениях поверхности таких ГЭС InAlAs/InP наблюдаются моноатомные ступени, среднеквадратичное значение шероховатости не превышает 0.6 нм. Спектры низкотемпературной фотолюминесценции таких ГЭС содержат единственный пик, обусловленный межзонными переходами.

---

1. Chistokhin I. B., Aksenov M. S. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2018. V. 74. P. 193–198.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук А. И. Торопов,  
Д. В. Дмитриев

**Моделирование атомной и электронной структуры  $\text{La}_2\text{O}_3$** 

А. А. Кручинская

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Оксид лантана является перспективным материалом в микро- и нано-электронике для применения в качестве запоминающей среды в элементах флэш-памяти и резистивной памяти. Электронные свойства диэлектриков определяются дефектами, а ключевой дефект для high-к диэлектриков – это вакансии кислорода. Для установления способности вакансий кислорода в  $\text{La}_2\text{O}_3$  участвовать в локализации заряда, а также в резистивном переключении в настоящей работе изучаются особенности энергетического спектра, которые вакансии кислорода обуславливают, иначе говоря – электронная структура вакансии кислорода.

Изучение электронной структуры вакансии кислорода осуществляется с помощью квантово-химического моделирования в рамках теории функционала плотности с гибридным обменно-корреляционным функционалом B3LYP. Достоинство данного подхода заключается в том, что он дает близкое к экспериментальному значение ширины запрещенной зоны оксида. Проводятся расчеты спектров полной и парциальной плотности электронных состояний в идеальной кристаллической структуре  $\text{La}_2\text{O}_3$ , а также структуре с вакансиями кислорода. В качестве проверки теоретической модели при описании  $\text{La}_2\text{O}_3$  проводится сравнение расчетных значений структурных параметров (получены:  $a_{1,2} = 3.902 \text{ \AA}$ ,  $a_3 = 6.117 \text{ \AA}$ , экспериментальные:  $a_{1,2} = 3.937 \text{ \AA}$ ,  $a_3 = 6.130 \text{ \AA}$ ), ширины запрещенной зоны (получено: 5.73 эВ, экспериментальное: 5.55 эВ  $a_1$ ), диэлектрической проницаемости (получено: 26,8, экспериментальное: 24–30) идеального кристалла  $\text{La}_2\text{O}_3$  с соответствующими экспериментальными данными из научной литературы. Впервые рассчитываются значения эффективных масс электронов и дырок для  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Установлено, что вакансии кислорода в оксиде лантана могут являться центром локализации и для электронов, и для дырок и таким образом участвовать в транспорте заряда.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Т. В. Перевалов

## Изготовление рентгеновских преломляющих линз методом ультраглубокой светодиодной фотолитографии

И. А. Лобова

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Известны различные технологические способы изготовления рентгеновских преломляющих линз. Данная работа посвящена разработке фотолитографического способа. Негативный фоторезист SU-8 наносился на металлические подложки толщиной 0,2–1,1 мм, облучался через фотошаблон с микронным зазором с последующим удалением необлученного вещества. В качестве источника использовался светодиод, излучающий на длине волны 400 нм. Данная длина волны соответствует спаду интенсивности электронного перехода в спектре удельного поглощения SU-8 [1]. Доза поглощенного излучения в слое резиста толщиной  $L$  на глубине  $x$  в течение времени  $t$  рассчитывалась по формуле:

$$D(t, x) = t \cdot \frac{p}{S} \cdot \mu \cdot \prod_i (1 - R_i) \cdot [e^{-\mu x} + R_s \cdot e^{-\mu(2L-x)}],$$

где  $p$  – измеренная мощность излучения светодиода,  $S$  – площадь облучения,  $\mu(\lambda) = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^{-1}$  – спектральный удельный коэффициент поглощения SU-8,  $R_i$  и  $R_s$  – коэффициенты отражения от границ раздела фотошаблон – воздух, фотошаблон – резист и подложка – резист. Время облучения рассчитывалось исходя из пороговой дозы и толщины резиста. Относительная величина дозы поглощения вглубь резиста мало отличается от единицы, поэтому искажения вглубь резистивного слоя минимальны.

Определены параметры технологических процессов для получения микроструктур линейных рентгеновских линз высотой до 1,1 мм с воспроизведением оптической геометрии и с вертикальными стенками. Качество микроструктур обусловлено наличием точечного светодиодного источника и параллельного пучка. Изготовлены рентгеновские преломляющие длинные (длиной до 100 мм) многоэлементные линзы методом ультраглубокой светодиодной фотолитографии.

Светодиодный фотолитографический способ является экономичным и перспективным для изготовления микроструктур микронной или миллиметровой высоты для других применений.

---

1. Reznikova E., Mohr J., Hein H. Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist layers // *Microsystem Technologies*. 2005. V. 11 (4–5). P. 282–291.

**Температурная зависимость диффузионного профиля  
адатомов на поверхности Si(111)**

М. А. Макеев

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск

Теоретические основы процессов эпитаксиального роста и сублимации, происходящих на поверхности Si(111), достаточно освещены в литературе. Одним из важных параметров поверхности является концентрация адатомов на террасах. Наиболее прецизионные экспериментальные данные о распределении концентраций адатомов получены на основе изучения кинетики движения и флуктуаций концентрических моноатомных ступеней [1]. Однако экспериментальных методик визуализации распределения адатомов на террасах не так много.

Данная работа направлена на определение фундаментальных параметров атомных процессов, протекающих на поверхности Si(111). Разработана методика изучения концентраций адатомов на широких террасах диаметром  $\sim 100$  мкм на поверхности Si(111) при температуре  $750$  °С. Основной частью работы является получение и обработка АСМ-изображений террас с разрешением  $3,6$  нм/пиксель для корректного подсчета доли площади, занимаемой фазой « $1\times 1$ », на которой в процессе формирования сверхструктурных доменов ( $7\times 7$ ) концентрируются адатомы кремния. Из полученных данных были построены диффузионные профили концентраций адатомов на поверхности Si(111). Исходя из этого распределения и известной равновесной концентрации адатомов вблизи ступеней, получена оценка длины диффузии адатомов –  $64,3\pm 1,5$  мкм.

---

1. Pang A. B., Man K. L. Step line tension and step morphological on the Si(111) ( $1\times 1$ ) surface // Phys. Rev. 2008. V. 77. P. 115424.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. Е. Родякина

**Электронные свойства однослойного графена с дефектами**

Н. Я. Муксунов

Северо-Восточный федеральный университет  
им. М. К. Аммосова, Якутск

Графен является одним из наиболее перспективных материалов для применения в новых устройствах нанoeлектроники, он обладает уникальными электронными свойствами. На данный момент графен применяют в качестве активного элемента при разработке устройств спинтроники, полевых транзисторов, для изготовления прозрачных электродов в дисплеях и солнечных батареях, а также во многих других электронных устройствах. В настоящее время одним из приоритетных направлений исследований является разработка методов, позволяющих целенаправленно модифицировать кристаллическую и электронную структуру графена для приобретения требуемых свойств, что позволит значительно увеличить область его практического применения. В настоящей работе исследуются электронные свойства однослойного графена, допированного дефектами.

Вычисления проводились с использованием программы Quantum Espresso. В основе лежит метод псевдопотенциала с использованием плоских волн в рамках теории функционала плотности (DFT). Влияние остовных электронов учитывалось путем использования ультрамягких псевдопотенциалов. Использовался локальный обменно-корреляционный функционал. Энергия обрезания плоских волн для самосогласованного расчета составляла 50 Ry. Для интегрирования линейной зоны Бриллюэна была использована сетка  $7 \times 7 \times 1$  в обратном пространстве. Для вычисления электронной структуры монослоя использовалась изолированная плоская структура. Во избежание взаимодействия между слоями расстояние между ними устанавливалось равным 15 Å. Рассчитаны зонная структура и плотность состояний графеновых нанолент типа зигзаг, допированных атомами азота.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. П. Шарин

**Исследование углового распределения эмитированных фотоэлектронов из GaAs фотокатода с отрицательным электронным средством**

Н. А. Назаров

Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Из хорошо известного ряда полупроводников и полупроводниковых соединений, например GaAs, возможна фотоэмиссия термализованных электронов при условии, что уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости, в состоянии так называемого эффективного отрицательного электронного средства (ОЭС). В отличие от прямой фотоэмиссии, когда сохраняется импульс и энергия эмитированного электрона, фотовозбужденные электроны в зону проводимости GaAs успевают рассеяться по импульсу и термализоваться до выхода в вакуум, т. е. потерять информацию о начальном состоянии в валентной зоне. Однако, прежде чем выйти в вакуум, электроны попадают в двумерную квантовую яму, образованную приповерхностной областью пространственного заряда, и эмиссия электронов осуществляется с уровней размерного квантования. При этом переходы между уровнями размерного квантования происходят через электрон-фононное взаимодействие с последующей эмиссией электрона в вакуум. Таким образом, угловое распределение эмитированных электронов несет информацию только о конечных состояниях в кристалле. Для изучения процесса эмиссии нами был собран вакуумный фотодиод, в котором оба электрода являлись полупроводниковыми гетероструктурами с ОЭС. Это позволило выявить и изучить ряд новых интересных фотоэмиссионных и инжекционных свойств электронов очень низкой энергии (0–300 мэВ). В работе были измерены энергетические распределения фотоэмитированных электронов. Подтверждено наличие тонкой структуры в фотоэмиссионных спектрах, связанной с рассеянием электронов на оптических фононах при выходе в вакуум через квантово-размерные состояния в области пространственного заряда. Проведено измерение пространственных распределений катодолуминесценции при температуре жидкого азота с различными ускоряющими напряжениями и дальнейший их пересчет в угловое распределение. Решена задача о вероятности прохождения электрона через приповерхностную ОПЗ. Получен коэффициент прохождения электрона через приповерхностный барьер в зависимости от угла его влета в ОПЗ и компоненты импульса параллельной поверхности полупроводника. Продемонстрирована связь коэффициента прохождения с законом дисперсии двумерных квантово-размерных уровней.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук О. Е. Терещенко

**Исследование морфологии границ раздела Au/Ti/InAlAs  
и анодный слой/InAlAs методом высокоразрешающей  
электронной микроскопии**

А. А. Недомолкина, А. К. Гутаковский, М. С. Аксенов,  
Н. А. Валишева, Д. В. Дмитриев  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск

Тройное соединение InAlAs является перспективным материалом для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов и СВЧ-фотодетекторов с барьером Шоттки. Хорошо известно, что границы раздела металл (диэлектрик)/InAlAs оказывают определяющее влияние на производительность, стабильность и надежность данных приборов. Строение данных границ раздела оказывает существенное влияние на их электрофизические характеристики, а также несет информацию о механизмах формирования.

Цель данной работы заключалась в изучении структурно-морфологических особенностей границ раздела металл (Au/Ti)/InAlAs(001) и диэлектрик (анодный слой)/InAlAs(001) методом высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ) с использованием электронных микроскопов JEOL 4000 EX и Titan 80-300.

Анализ ВРЭМ-изображений границы раздела Au/Ti/InAlAs показал, что Au и Ti имеют поликристаллическую структуру с кубической ( $a = 4.08 \text{ \AA}$ ) и гексагональной ( $a = 2.96 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.69 \text{ \AA}$ ) решетками соответственно. На границе раздела присутствует тонкий (1.5–2 нм) аморфный оксидный слой, наличие которого также подтверждается данными рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Шероховатость границы раздела не превышает 2–3 монослоя.

Анализ ВРЭМ-изображений границы раздела анодный слой/InAlAs, сформированной окислением поверхности InAlAs в таунсендовской газоразрядной плазме ( $O_2$ , Ar), показал, что граница характеризуется резким переходом аморфный слой/полупроводник, а также высокой гладкостью (шероховатость не превышает 1–2 монослоя). Формирование анодного слоя во фторсодержащей газоразрядной плазме ( $O_2$ ,  $CF_4$ , Ar) приводит к увеличению шероховатости границы раздела примерно в два раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00548.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. К. Гутаковский

**Пассивация поверхности InAlAs анодными слоями,  
сформированными в таунсендовской газоразрядной плазме**

А. А. Нужина, М. С. Аксенов, Н. А. Валишева, Д. В. Дмитриев,  
А. К. Гутаковский, А. А. Недомолкина, А. П. Ковчавцев  
Новосибирский государственный технический университет  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск

Тройное соединение InAlAs является перспективным материалом для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов и СВЧ-фотодетекторов. Достижение предельных параметров данных приборов обеспечивается в том числе решением актуальной задачи формирования границы раздела диэлектрик/InAlAs с низкой плотностью электронных состояний (density of interface traps,  $D_{it}$ ). В представленных к настоящему времени работах, посвященных формированию границы раздела диэлектрик/InAlAs, величина  $D_{it}$  составляет более  $5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ .

Одним из методов пассивации, который позволил резко (до значений  $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$  (77 K)) снизить  $D_{it}$  на границе раздела диэлектрик/InAs, является формирование на поверхности полупроводника фторсодержащих анодных оксидных слоев (АОС) методами электролитического или плазмохимического окисления. Близость составов позволяет предположить, что данная методика пассивации будет эффективна и для InAlAs.

Целью данной работы было изучение пассивационных свойств АОС, сформированных на поверхности InAlAs в таунсендовской газоразрядной плазме (ТПП) в среде  $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CF}_4$ . Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показано, что АОС без фтора состоит в основном из  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Введение  $\text{CF}_4$  в состав окислительной среды приводит к накоплению фтора в анодной пленке и образованию оксифторидов элементов полупроводника. Методом электронной микроскопии высокого разрешения изучена морфология границ раздела АОС/InAlAs, сформированных без и с добавлением  $\text{CF}_4$ . Анализ ВФХ  $\text{Au/SiO}_2/\text{InAlAs}$  МДП-структур показал, что модификация поверхности InAlAs окислением в ТПП без  $\text{CF}_4$  перед осаждением  $\text{SiO}_2$  обеспечивает существенное уменьшение  $D_{it}$  вблизи середины запрещенной зоны. Введение фторсодержащего анодного подслоя на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{InAlAs}$ , наоборот, приводит к закреплению уровня Ферми ниже середины запрещенной зоны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00548.

Научный руководитель – канд. хим. наук Н. А. Валишева

## **Ab initio расчет зонной структуры графеновой наноленты**

В. В. Пономарев

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск

Графеновые наноленты – это квазиодномерные углеродные структуры, получаемые в результате «разрезания» графенового листа на полосы нанометровой ширины. В последние годы достигнут значительный прогресс в изготовлении графеновых нанолент (GNRs), что открывает новые возможности нанотехнологии в создании устройств спинтроники. С получением графена в свободном состоянии эти объекты стали активно изучаться как теоретически, так и экспериментально.

В данной работе с помощью квантово-химических методов были детально исследованы электронные свойства нанолент типа зигзаг (ZGNR) различной ширины. Проведено исследование электронных свойств таких структур в зависимости от ширины нанолент типа зигзаг.

Все вычисления проводились с использованием программы Quantum Espresso. В основе лежит метод псевдопотенциала с использованием плоских волн в рамках теории функционала плотности (DFT). Влияние остовных электронов учитывалось путем использования ультрамягких псевдопотенциалов. Использовался нелокальный обменно-корреляционный функционал в параметризации Perdew – Burke – Ernzerhof (PBE). Энергия обрезания плоских волн для самосогласованного расчета составляла  $\epsilon_0$  Ry. Для интегрирования линейной зоны Бриллюэна была использована сетка  $9 \times 9 \times 1$  в обратном пространстве. Для вычисления электронной структуры монослоя использовалась изолированная плоская структура. Во избежание взаимодействия между слоями расстояние между ними устанавливалось равным  $15 \text{ \AA}$ .

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. П. Шарин

**Взаимодействие поверхности Si(111) с молекулярным пучком селена**

С. А. Пономарев

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск

Одним из актуальных и динамично развивающихся направлений физики конденсированного состояния является изучение свойств и способов синтеза тонких пленок халькогенидов металлов ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и т. д.) на поверхности различных полупроводниковых подложек. Гетеропереходы структур полупроводник/полупроводник приобрели значительный интерес с точки зрения как фундаментальной физики, так и технологических приложений. Почти все полупроводниковые устройства содержат гетерограницы, а электронные свойства этих гетерограниц решающим образом влияют на широкий спектр физических процессов, протекающих вблизи них, и определяют характеристики устройств. Se, как полупроводник p-типа, проявляет фотоэлектрические свойства. Эти свойства делают Se полезным в производстве фотоэлементов. На данный момент взаимодействие поверхности полупроводников, в частности поверхности Si(111), с Se исследовано слабо. Известно, что при взаимодействии молекулярного пучка Se с поверхностью Si(111) происходит образование молекул  $\text{SiSe}_2$  с их последующей десорбцией, однако эволюция морфологии поверхности Si(111) в этих условиях не изучалась.

В данной работе методом *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ) исследовалось взаимодействие поверхности Si(111) с молекулярным пучком Se при различных скоростях осаждения и температурах подложки 560–1280 °С. В процессе эксперимента наблюдались смещение ступеней в направлении вышележащих террас и зарождение двумерных вакансионных островков, что соответствовало травлению поверхности Si(111) молекулярным пучком Se. Получены температурные зависимости скорости травления поверхности Si(111) молекулярным пучком Se.

Методом дифракции быстрых электронов на отражение изучены сверхструктурные переходы на поверхности Si(111) при взаимодействии с молекулярным пучком Se. Построена фазовая диаграмма реконструкций поверхности в зависимости от скорости осаждения Se и температуры подложки. Показано изменение температуры сверхструктурного перехода  $(1 \times 1) \leftrightarrow (7 \times 7)$  на узких и широких террасах при воздействии на поверхность молекулярного пучка Se.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. И. Роголо

**Релаксация фотопроводимости массива квантовых точек Ge/Si  
в магнитном поле**

Я. Е. Попов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Целью данной работы является выявление механизмов воздействия магнитного поля на скорость релаксации фотопроводимости двумерного массива туннельно-связанных квантовых точек (КТ) Ge/Si. Доминирующим типом проводимости исследуемой системы при низких ( $<30$  К) температурах является прыжковая проводимость дырок по локализованным состояниям КТ, разброс энергетических уровней которых определяется разницей размеров КТ и их неупорядоченным расположением в плоскости роста. Ранее было показано, что в этой системе наблюдается фотопроводимость с медленной кинетикой релаксации, которая была объяснена изменением заполнения КТ дырками при освещении.

Проведены измерения релаксации фотопроводимости в магнитном поле для образцов с разным фактором заполнения КТ дырками. Показано, что при заполнении больше 2 наблюдается замедление релаксации, что можно объяснить как сжатием волновых функций дырок в магнитном поле, так и подавлением прыжковых переходов из-за снятия вырождения по спине. В структурах с фактором заполнения меньше 2 наблюдается ускорение релаксации в магнитном поле. Предложено два подхода к объяснению экспериментальных данных. Первый основан на экспоненциально широком распределении времен переходов неравновесных дырок с ловушек в КТ. Второй основан на предположении, что процесс возвращения дырок в КТ зависит от величины барьера, определяемого уровнем заполнения квантовых точек дырками. Эксперименты с включением света на разных этапах релаксации показали, что первый подход не может объяснить экспериментальные данные.

На основе барьерного подхода построены две математические модели: в первой рассматривается только динамика заполнения квантовых точек, а во второй – также изменение заполнения ловушек. Показано, что вторая модель обеспечивает хорошее согласие с экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод о существенном вкладе состояний ловушек в процесс релаксации фотопроводимости массива квантовых точек.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Н. П. Степина

**Зависимость твердости и пористости композита  
«гидроксиапатит – многостенные углеродные нанотрубки»  
от концентраций примеси многостенных углеродных нанотрубок**

А. Е. Резванова

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Изучены зависимости твердости по Виккерсу и пористости биоактивного композита на основе гидроксиапатита (ГА) от концентраций примеси многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ). Установлена оптимальная температура, скорость нагрева и атмосфера для получения наиболее твердого композита с минимальной пористостью. Пористость и объемная плотность спеченных образцов оценивались по методу Архимеда. Удельная поверхность ( $S_{\text{ВЕТ}}$ ) образцов определялась методом адсорбции/десорбции азота с использованием анализатора «СОРБОМЕТР-М» (Катакон, Россия). Твердость по Виккерсу полированных спеченных образцов исследовалась с использованием ультрамикротестера Shimadzu для динамических испытаний DUN-211. Получены зависимости твердости и пористости композита от концентраций МУНТ. Установлено, что добавление МУНТ с концентрациями до 0.5 вес. % приводит к получению композитной керамики с более высокой твердостью по Виккерсу и плотностью. В то же время пористость и удельная поверхность полученного композита уменьшается. Установлено, что наличие добавок МУНТ уменьшает температурные градиенты в керамике во время спекания благодаря лучшей теплопроводности и электрической проводимости МУНТ, что приводит к более плотной и твердой керамике.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук М. С. Барабашко,  
канд. физ.-мат. наук А. Н. Пономарев

**Исследования структуры пучков одностенных углеродных нанотрубок методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии**

И. Н. Саламатов

Новосибирский государственный университет

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) имеют уникальные физико-химические свойства и являются перспективным технологическим материалом. Для их практического применения и контролируемого синтеза необходимы данные о структуре.

Известно, что ОУНТ представляют из себя свернутый графеновый лист с диаметром от 0.5 до 3 нм и длиной порядка микрометров. В результате сил Ван-дер-Ваальса нанотрубки самоорганизуются в пучки, образующие двумерную плотнейшую упаковку [1]. От такой наноструктуры в области малых углов до  $25^\circ$   $2\theta$  появляется межчастичная дифракция. По данным просвечивающей электронной микроскопии в образцах ОУНТ наблюдаются широкое распределение нанотрубок по диаметрам и дефекты их упаковки в пучки. Это приводит к трудностям в применении стандартных подходов рентгеноструктурного анализа. Для того чтобы понять, как влияют параметры трубок на дифракционную картину, необходимо привлечь численные расчеты.

По этой причине в работе используется метод DFA (Debye Function Analysis) [2], позволяющий рассчитать полный профиль дифрактограммы от любой совокупности атомов. Главной трудностью данного метода является построение атомной модели для сложных систем. В рамках представленной работы предлагается алгоритм построения модели пучков ОУНТ с распределением нанотрубок по диаметрам. Для этого было разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять построение атомной модели и расчет дифрактограмм по формуле Дебая одиночных ОУНТ и МУНТ, пучков идентичных нанотрубок и пучков, состоящих из нанотрубок разных диаметров, соответствующих выбранной функции распределения. Проведен анализ влияния параметров модели на дифрактограмму. На основании полученных данных предложена методика, позволяющая определить функцию распределения нанотрубок по диаметрам для реальных образцов ОУНТ.

---

1. Thess A., Lee R., Nikolaev P. et al. // Science. 1996. V. 273. P. 5274.

2. Yatsenko D. A., Tsybulya S. V. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2012. V. 76. P. 382.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук Д. А. Яценко,  
д-р хим. наук А. А. Хасин

**Разработка мощных ИК-излучателей на основе ГЭС AlGaAs/GaAs**

Н. А. Солдатов, Д. В. Дмитриев  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В современной носимой технике требуются мощные излучатели инфракрасного диапазона с низким энергопотреблением. При  $\lambda = 850$  и  $920$  нм наблюдается наименьшее ослабление оптического сигнала в атмосфере. Поэтому целью работы является создание ИК-излучателей данных длин волн с высокой интенсивностью излучения и низкими пороговыми токами.

Для увеличения интенсивности излучения ИК-излучателей предлагается использовать распределенный брэгговский отражатель (РБО), помещенный под активной областью. На основе литературных данных и результатов расчетов оптимальными РБО для  $\lambda = 850$  и  $920$  нм являются гетероструктуры из чередующихся слоев  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$  толщинами  $\lambda/4n$ , где  $\lambda$  – длина волны излучателя;  $n$  – показатель преломления слоя.

Метод МЛЭ позволяет получать точные составы, толщины слоев и резкие гетерограницы для синтеза требуемых структур. Однако резкие гетерограницы являются барьерами для носителей зарядов, что может приводить к увеличению сопротивления структуры и ухудшению электрооптических характеристик прибора. Барьеры обусловлены образованием ОПЗ, состоящего из положительно заряженного обедненного электроном слоя в широкозонном  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$  и отрицательно заряженного обедненного дырками слоя в  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ . Для уменьшения высоты барьеров было предложено создание плавного перехода на гетерогранице и модуляционно-легированных гетероструктур.

Теоретически рассчитаны толщины слоев РБО для 850 нм:  $L_{x=0,9} = 69.4$  нм и  $L_{x=0,1} = 59.5$  нм; для 920 нм:  $L_{x=0,9} = 75.7$  нм и  $L_{x=0,1} = 65.7$  нм. Минимальное число пар слоев, необходимое для достижения коэффициента отражения  $R > 90$  %, составляет 24 периода РБО.

На установке Riber Compact-21T были синтезированы тестовые образцы, измерены спектры отражения и удельные сопротивления. Получены поправочные коэффициенты толщин для роста структуры требуемой длины волны. На основании полученных результатов разработаны подходы роста мощных излучателей на 850 и 920 нм.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук К. С. Журавлев,  
Д. В. Дмитриев

**Исследование влияния рецесса на электрические характеристики  
низкотемпературных омических контактов  
к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN**

И. В. Федин, В. В. Федина  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

В данной работе рассматривается влияние рецесса на электрические характеристики низкотемпературных омических контактов на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN.

В экспериментах использовались эпитаксиальные гетероструктуры типа AlGaIn/GaN, выращенные методом металлорганической газовой эпитаксии на подложках кремния. Гетероструктура включала в себя буферный слой на основе легированного железом GaN толщиной 2 мкм, канальный слой из нелегированного GaN, барьерный слой  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$  толщиной 12 нм и защитный GaN слой. Методом плазмохимического травления на пластинах формировалась меза-изоляция. Далее, на поверхности пластин литографическими методами формировалась двухслойная фоторезистивная маска, в которой вскрывались окна для формирования металлизации омических контактов. Затем на части пластин производилось плазмохимическое травление рецесса глубиной  $h_{РЕЦ} = 50, 75, 100$  и  $125\%$  от толщины AlGaIn барьерного слоя. Методом электронно-лучевого напыления в вакууме производилось напыление металлизации омического контакта на основе тонких пленок Ta/Al/Ti (10/300/20 нм). После напыления металлизации омических контактов фоторезистивная маска удалялась и проводился быстрый термический отжиг контактов при температуре  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение  $t = 60$  сек в атмосфере очищенного азота.

В результате работы было установлено, что приведенное контактное сопротивление омического контакта уменьшается по мере приближения границы контакта к области двумерного электронного газа (травление рецесса на глубину 50 и 75 %), а затем резко возрастает при пересечении проводящего канала гетероструктуры AlGaIn/GaN (травление рецесса на глубину 100 и 125 %). Получен омический контакт на основе Ta/Al/Ti, характеризующийся низким значением приведенного контактного сопротивления ( $0.4\text{ Ом}\cdot\text{мм}$ ), а также гладкой морфологией поверхности контактной площадки и ее края после термической обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0250 от 26.09.17). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0250.

Научный руководитель – канд. техн. наук Е. В. Ерофеев

## Релаксационная кинетика фотоэмиссии из GaAs(Cs,O) при различных температурах

В. С. Хорошилов

Новосибирский государственный университет

Поверхности полупроводников с относительно небольшим (0.2–0.4 эВ) положительным электронным сродством привлекают внимание в связи с возможностью создания новых преобразователей солнечной энергии, более эффективных, чем фотовольтаические, за счет использования фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии. Арсенид галлия перспективен для создания таких преобразователей благодаря оптимальной ширине запрещенной зоны и возможности получения оптимального электронного сродства путем нанесения на поверхность GaAs(001) цезиевого покрытия. Однако практическое использование поверхности Cs/GaAs осложняется ее неравновесностью, приводящей к термической нестабильности из-за необратимых релаксационных процессов в цезиевом слое при нагревании. Решением этой проблемы может оказаться использование поверхности с цезий-кислородным покрытием, так как на ней адатомы цезия обладают большей энергией связи благодаря наличию кислорода.

Для изучения релаксационных процессов на поверхности GaAs(Cs,O) в настоящей работе проведено исследование кинетики тока фотоэмиссии после нанесения на поверхность арсенида галлия цезия и кислорода при различных температурах. Кинетика после нанесения цезия, будучи направленной в сторону роста фототока при комнатной температуре, при нагревании становится немонотонной (с несколькими максимумами и минимумами). Такие изменения формы кинетики говорят о том, что она состоит из нескольких процессов, по-разному зависящих от температуры. Кинетика после нанесения кислорода приводит только к росту фототока, но при этом ее описание также требует рассмотрения нескольких процессов. В настоящей работе кинетика описывалась тремя экспоненциальными слагаемыми с временами затухания от 0.5 до 30 мин. Показано, что при нанесении цезия характерные времена кинетики снижаются при росте температуры, что связано с ускорением релаксационных процессов, а при нанесении кислорода ведут себя немонотонно, предположительно, из-за подключения новых процессов при нагревании поверхности.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Г. Журавлев

**Анизотропия магнитотранспорта в полуметаллической системе на основе квантовой ямы HgTe (013) толщиной 14 нм**

Д. А. Худайбердиев

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова

СО РАН, Новосибирск

Новосибирский государственный университет

Квантовые ямы на основе теллурида ртути интенсивно изучаются уже более 10 лет благодаря разнообразию получаемых на их основе систем: дираковские фермионы, двумерный и трехмерный топологические изоляторы, полуметаллическое состояние. Электронно-дырочная система реализуется при толщине слоя HgTe 14–22 нм. В ней возможно изучение как чисто электронного состояния, так и состояния, когда меньшие по числу высокоподвижные электроны двигаются на фоне медленных дырок, концентрация которых на три порядка больше электронной [1]. По технологическим причинам рост пленок HgTe осуществляется преимущественно в направлении (013) [2], что приводит к высокому качеству таких систем с подвижностью более  $0.5 \times 10^6$  см<sup>2</sup>/Вс [3] и возможности изучения тонких физических эффектов. Однако логично, что отклонение направления роста от симметричного может приводить к анизотропии закона дисперсии и рассеяния носителей в плоскости квантовой ямы. Такая анизотропия транспортных свойств полуметалла на основе HgTe до сих пор не была изучена, чему посвящена данная работа.

В работе измеряется магнетосопротивление в квантовой яме HgTe шириной 14 нм в двух перпендикулярных направлениях [100] и [03-1]. Для этого используется 10-контактный L-образный холловский мостик, снабженный металлическим затвором. Показано, что в нулевом магнитном поле вблизи точки зарядовой нейтральности (когда число электронов равняется числу дырок) анизотропия сопротивления в двух перпендикулярных направлениях практически отсутствует ( $\rho_{xx}/\rho_{yy} \approx 1$ ). Неожиданным оказался факт значительно более сильной анизотропии сопротивления при расположении уровня Ферми в зоне проводимости ( $\rho_{xx}/\rho_{yy} \approx 6$ ) по сравнению с ситуацией, когда основной вклад в транспорт дают дырки той же концентрации ( $\rho_{xx}/\rho_{yy} \approx 1.5$ ). В работе проводится анализ степени анизотропии подвижности электронов и дырок в зависимости от их концентраций и ее связь с кристаллографическим направлением.

- 
1. Savchenko M. L. et al. // JETP Lett. 2018. V. 108. P. 253.
  2. Kvon Z. D. et al. // Low Temp. Phys. 2009. V. 35. P. 10.
  3. Dobretsova A. A. et al. // JETP Lett. 2015. V. 101. P. 330.

Научный руководитель – М. Л. Савченко

**Исследование влияния магнитного поля  
на процесс электроосаждения металлов в поры трековой мембраны  
и структуры получаемых нанопроволок**

Д. А. Черкасов<sup>1</sup>, И. М. Долуденко<sup>1,2</sup>, А. С. Шаталов<sup>1,2</sup>, С. А. Хечумян<sup>2,3</sup>,  
Р. И. Хайбуллин<sup>4</sup>, Д. А. Бизяев<sup>4</sup>, Г. Г. Бондаренко<sup>1</sup>, Д. Л. Загорский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва

<sup>2</sup> Институт кристаллографии РАН, Москва

<sup>3</sup> Московский государственный университет

<sup>4</sup> Казанский физико-технический институт

Нанопроволоки (НП) из магнитных материалов представляют как научный, так и практический интерес. Целью настоящей работы было изучение влияния магнитного поля на рост НП на примере массива гомогенных НП из Со и сплава NiFe, полученных методом матричного синтеза. Использовалось гальваническое осаждение металла из раствора соответствующих солей в поры трековых мембран (со средним диаметром 100 нм). Во время электроосаждения прикладывалось магнитное поле (МП) (напряженностью от 0 до 0,3 Тл), параллельное оси растущих НП.

При электроосаждении НП снимались зависимости тока от времени, которые показали, что приложение магнитного поля уменьшает время осаждения. В частности, время осаждения НП из сплава FeNi без МП составляло порядка 480 сек., тогда как в магнитном поле с индукцией 0,2 Тл время осаждения понизилось до 410 сек. Данная тенденция наблюдалась для всех конфигураций металлов и полей.

Полученные образцы исследовались методами РСА, СЭМ МСМ и магнитометрии. Рентгеноструктурный анализ показал влияние магнитных полей: изменяется соотношение интенсивности линий, которое может свидетельствовать о появлении текстуры. При этом изменения наблюдаются при приложении полей до 0,15 Тл, дальнейшее увеличение поля до 0,3 Тл уже не приводит к изменениям в спектрах. СЭМ исследование образцов после удаления полимерной матрицы показало, что приложение поля заметно меняет и топографию НП (длина и форма), при этом различие НП выращенных в полях 0,15 и 0,3 Тл уже незначительно.

МСМ-исследования горизонтально расположенных НП показали перемагничивание никелевых НП во внешнем поле и стабильность магнитного состояния НП из кобальта. В работе приведены и обсуждаются результаты магнитометрии – петли гистерезиса наведенной и остаточной намагниченности.

Работа проделана на оборудовании ИК РАН и КФТИ РАН.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук Г. Г. Бондаренко,  
канд. физ.-мат. наук Д. Л. Загорский

**Матричный синтез как способ получения источника ТГц излучения**

А. С. Шаталов<sup>1</sup>, Г. Г. Бондаренко<sup>1</sup>, С. Г. Чигарев<sup>2</sup>, И. Н. Дюжиков<sup>2</sup>,  
Д. Л. Загорский<sup>3</sup>, И. М. Долуденко<sup>1,3</sup>, Д. А. Черкасов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники  
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино

<sup>3</sup>Федеральный научно-исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

Нанопроволоки (НП) получают методом матричного синтеза, принцип которого заключается в электрохимическом (гальваническом) заполнении пор матрицы (темплата) металлом. Метод дает возможность получения, в частности, НП, состоящих из чередующихся слоев различных металлов. Такие структуры, включающие переходы между двумя магнитными, представляют интерес для электроники и спинтроники. Известно, что контакт двух магнитных металлов может использоваться как излучатель электромагнитных волн. Принцип действия такого излучателя заключается в прохождении спин-поляризованного тока через границу различных ферромагнитных металлов. Поскольку равновесная поляризация и энергия электронов в металлах отличаются, протекание тока (спин-поляризованного в одном из металлов (инжекторе)) через такой переход приводит к возбужденному состоянию электронов. Релаксация последнего приводит к испусканию электромагнитного излучения, часто приходящегося на ТГц диапазон.

В настоящей работе для получения гетероструктурных НП успешно применялся «двухванновый» метод, который заключается в последовательном росте двух разных металлов в двух разных электролитах: получены массивы НП из комбинации металлов Ni/Co, Co/Ni, Ni/Fe и Fe/Co. Гетеропереходы были получены и другим методом: каналы трековых мембран полностью заполнялись металлом (инжектором), а на поверхность наносился тонкий слой другого металла (рабочий слой). При этом использовалось магнетронное нанесение металла, толщина которого должна быть достаточной для пропускания тока высокой плотности, в тоже время слой должен быть прозрачным для ТГц-излучения.

Излучательные характеристики полученных образцов были исследованы на двух приборах на оптоакустическом преобразователе (ячейка Голея) и на фурье-спектрометре Vertex 80v при комнатной температуре. Получены спектры испускаемых электромагнитных излучений, показана возможность генерации электромагнитных волн в диапазоне 10–15 ТГц при мощности до 10 мкВт.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Г. Г. Бондаренко

**Тепловизионное исследование  
сорбционной активности поверхности твердотельных структур**

А. В. Шепелин

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова  
СО РАН, Новосибирск

Тема настоящей работы актуальна для физики твердого тела и химической кинетики гетерогенных реакций в системах типа «твердое тело – газ», так как она может расширить теоретические знания в этой научной области. Решаемые задачи затрагивают также проблему низкотемпературного катализа, в частности вопросы, связанные с протеканием реакции окисления угарного газа до  $\text{CO}_2$ .

Цель проведенных экспериментальных исследований состоит в получении и количественном анализе динамических характеристик температуры твердотельных структур разного химического состава и полиморфной модификации при протекании сорбционных процессов на их поверхности. Вариация температуры при этом обусловлена выделением и поглощением теплоты фазового перехода первого рода (или теплоты адсорбции) при взаимодействии молекул газа с адсорбентом, а также экзотермическим характером каталитической реакции окисления.

Инструментом для измерений поверхностного распределения температуры образцов служит спектрально-узкополосный коротковолновый матричный тепловизор ТКВр-ИФП/СВИТ высокого временного и температурного разрешения (100 кадров/с, 0,03 °С) [1]. Одновременно по четыре разнотипных образца, собранных в единую библиотеку, помещались в специальную камеру-реактор, куда по мере необходимости вводились различные газы ( $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ , сухой и влажный воздух и др.), а также их смеси. В режиме десорбции газ откачивался из камеры форвакуумным насосом до остаточного давления  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  атм.

В результате проделанной работы получены характеристики температурной динамики на образцах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}$  и др., в том числе на оксидных носителях, содержащих наночастицы металлов. Образцы для исследований были предоставлены технологическими группами ИК СО РАН и химического факультета МГУ. Проведена математическая обработка тепловизионных данных и выявлены характеристики сорбционной и каталитической активности поверхности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00956).

---

1. Vainer B. G. // QIRT Journal. 2008. V. 5. № 2. P. 175–193.

## Указатель авторов

Аксенов М. С. ....	23, 24	Колосовский Д. А. ....	17
Бизяев Д. А. ....	34	Кручинская А. А. ....	18
Бондаренко Г. Г. ....	34, 35	Лобова И. А. ....	19
Бондаренко С. В. ....	5	Макеев М. А. ....	20
Боякинов Е. Ф. ....	6	Муксунов Н. Я. ....	21
Валишева Н. А. ....	23, 24	Назаров Н. А. ....	22
Винокуров П. В. ....	6	Недомолкина А. А. ....	24
Власов Л. К. ....	7	Недомолкина А. А. ....	23
Герт С. С. ....	8	Нужина А. А. ....	24
Горбунов Е. А. ....	9	Пономарев В. В. ....	25
Гребенщикова Е. А. ....	7	Пономарев С. А. ....	26
Гутаковский А. К. ....	24	Попов Я. Е. ....	27
Гутаковский А. К. ....	23	Резванова А. Е. ....	28
Давыдов В. Н. ....	12, 15	Саламатов И. Н. ....	29
Дмитриев Д. В. ....	30	Семенова А. А. ....	6
Дмитриев Д. В. ....	17, 23, 24	Сидоров В. Г. ....	7
Долуденко И. М. ....	34, 35	Солдатов Н. А. ....	30
Дутов В. А. ....	10	Федин И. В. ....	31
Дюжиков И. Н. ....	35	Федина В. В. ....	31
Евсеев К. В. ....	11	Хайбулин Р. И. ....	34
Загорский Д. Л. ....	34, 35	Хечумян С. А. ....	34
Задорожный О. Ф. ....	12	Хорошилов В. С. ....	32
Заялов Т. М. ....	13	Худайбердиев Д. А. ....	33
Захаркина Е. И. ....	6	Черкасов Д. А. ....	34, 35
Капогузов К. Е. ....	14	Чигарев С. Г. ....	35
Каранкевич О. А. ....	12, 15	Шаталов А. С. ....	34, 35
Катаманин И. Н. ....	16	Шепелин А. В. ....	36
Квеглис Л. И. ....	8	Шутаев В. А. ....	7
Ковчавцев А. П. ....	24	Яковлев Ю. П. ....	7

## Содержание

Бондаренко С. В. ....	5
Боякинов Е. Ф., Захаркина Е. И., А. А. Семенова, П. В. Винокуров .....	6
Власов Л. К., Гребенщикова Е. А., Шутаев В. А., Сидоров В. Г., Яковлев Ю. П. ....	7
Герт С. С., Квеглис Л. И. ....	8
Горбунов Е. А. ....	9
Дутов В. А. ....	10
Евсеев К. В. ....	11
Задорожный О. Ф., Давыдов В. Н., Каранкевич О. А. ....	12
Залялов Т. М. ....	13
Капогузов К. Е. ....	14
Каранкевич О. А., Давыдов В. Н. ....	15
Катаманин И. Н. ....	16
Колосовский Д. А., Дмитриев Д. В. ....	17
Кручинская А. А. ....	18
Лобова И. А. ....	19
Макеев М. А. ....	20
Муксунов Н. Я. ....	21
Назаров Н. А. ....	22
Недомолкина А. А., А. К. Гутаковский, Аксенов М. С., Валишева Н. А., Дмитриев Д. В. ....	23
Нужина А. А., Аксенов М. С., Валишева Н. А., Дмитриев Д. В., Гутаковский А. К., Недомолкина А. А., Ковчавцев А. П. ....	24
Пономарев В. В. ....	25
Пономарев С. А. ....	26
Попов Я. Е. ....	27
Резванова А. Е. ....	28
Саламатов И. Н. ....	29
Солдатов Н. А., Дмитриев Д. В. ....	30
Федин И. В., Федина В. В. ....	31
Хорошилов В. С. ....	32
Худайбердиев Д. А. ....	33
Черкасов Д. А., Долуденко И. М., Шаталов А. С., Хечумян С. А., Хайбулин Р. И., Бизяев Д. А., Бондаренко Г. Г., Загорский Д. Л. ....	34
Шаталов А. С., Бондаренко Г. Г., Чигарев С. Г., Дюжиков И. Н., Загорский Д. Л., Долуденко И. М., Черкасов Д. А. ....	35
Шепелин А. В. ....	36

Научное издание

МНСК-2019

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Материалы  
57-й Международной научной студенческой конференции

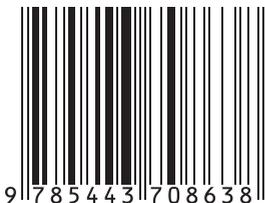
14–19 апреля 2019 г.

Корректор *Д. И. Ковалева*  
Верстка *О. А. Тенекеджи*  
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 01.04.2019 г.  
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 2,5. Усл. печ. л. 2,4.  
Тираж 64 экз. Заказ № 35.  
Издательско-полиграфический центр НГУ.  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Секция  
ФИЗИКА  
ТВЕРДОГО ТЕЛА

ISBN 978-5-4437-0863-8



**N\*** Новосибирский  
государственный  
университет  
**\*НАСТОЯЩАЯ НАУКА**

