

# **ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

Тезисы докладов Всероссийской  
научной молодежной конференции



**22 - 26 ноября 2021  
Санкт-Петербург**

**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС  
Санкт-Петербург  
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
И НАНОСТРУКТУР,  
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ  
ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Тезисы докладов Всероссийской  
научной молодежной конференции

22–26 ноября 2021 года



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург

2021

ББК 22.3  
Ф48

**Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника** : тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции, 22–26 ноября 2021 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 112 с.

ISBN 978-5-7422-7511-4

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

## ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)

УДК 539.184, 539.189

А.К. Вершовский (д.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

### КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ТЕПЛОВЫХ АТОМАХ И АТОМОПОДОБНЫХ СТРУКТУРАХ

Несмотря на то, что первые оптические квантовые датчики, предназначенные для прецизионного измерения частоты и индукции магнитного поля, появились еще в середине прошлого века, бурный всплеск их развития пришелся на начало нашего столетия; это в первую очередь было связано с появлением стабильных малогабаритных лазеров на полупроводниковых структурах. В докладе дается обзор основных физических принципов квантовых датчиков частоты (т.н. атомных часов, или стандартов частоты и времени), магнитного поля (магнитометров), угла и скорости вращения (гироскопов); рассматриваются основные достижения и проблемы в этой области.

Особое внимание уделено датчикам магнитного поля и их применению в задачах биологии и медицины, в первую очередь в магнитной кардиографии (МКГ) и магнитной энцефалографии (МЭГ) головного мозга. Сверхчувствительные датчики МЭГ способны регистрировать магнитные поля, создаваемые токами, распространяющимися по дендритам нейронов коры головного мозга, и характеризующиеся величинами на 9-10 порядков меньшими, чем магнитное поле Земли. Методы МЭГ сочетают высокое временное и пространственное разрешение, и предоставляют уникальную возможность локализации нейронной активности в объеме мозга, недоступную при использовании электроэнцефалографических методов. В докладе рассмотрены как демонстрирующие рекордную чувствительность на уровне десятых долей фемтотесла магнитометры SERF, работающие в нулевом магнитном поле [1], так и датчики, по чувствительности приближающегося к датчикам SERF, но при этом способные функционировать в ненулевых магнитных полях [2,3]. Чувствительный элемент такого датчика – ячейка с металлом в газообразной фазе – может иметь объем менее  $1 \text{ см}^3$ , что позволяет размещать датчики в непосредственной близости от объекта.

Также дан краткий обзор работ по созданию субмиллиметровых оптических датчиков на атомоподобных структурах – центрах окраски в твердом теле (кристалле алмаза) [4].

1. J.C. Allred et al. Physical Review Letters, **89**, 130801 (2002).
2. M.E. Limes et al. Phys. Rev. Applied, **14**, 011002, (2020).
3. M.V. Petrenko et al. Phys. Rev. Applied, **15**, 064072, (2021).
4. A.K. Dmitriev, A.K. Vershovskii. Tech. Phys., **65**, 1301 (2020).

## СПИНОВЫЕ ШУМЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Исследования спиновых явлений превратились в бурно развивающееся направление в физике полупроводников и полупроводниковых наноструктур. Обычно исследуется динамика спинов в условиях их оптической ориентации, когда спиновая система возмущается поляризованным светом. За последнее десятилетие в арсенале исследователей утвердился один метод исследования спиновой динамики – спектроскопия спинового шума. В отличие от традиционных методов он не требует вывода системы из состояния термодинамического равновесия и основан на изучении временных и спектральных корреляционных функций спиновых флуктуаций, которые детектируются по стохастическому фарадеевскому вращению плоскости поляризации луча, зондирующего среду. Такой метод был предложен и реализован Е.Б. Александровым и В.С. Запасским в атомных парах 40 лет назад, однако именно в применении к полупроводникам спектроскопия спиновых флуктуаций оказалась наиболее успешной. Работы Александрова и Запасского были отмечены в этом году Государственной премией РФ в области науки и технологий.

В условиях термодинамического равновесия шумовые характеристики и линейный отклик системы связаны, поэтому анализ спектров флуктуаций оптических сигналов Фарадея или Керра позволяет определять частоты спиновой прецессии носителей заряда в магнитном поле, средние значения и величины разброса эффективных  $g$ -факторов, времена спиновой релаксации и другие параметры спиновой динамики. В неравновесных условиях спектроскопия спиновых шумов позволяет получить богатую информацию о динамике спинов.

В докладе обсуждаются достижения в теоретических и экспериментальных исследованиях спиновых флуктуаций в объемных полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Теоретические модели проиллюстрированы экспериментальными данными.

Работа поддержана проектом РНФ № 19-12-00051.

1. Е.Б. Александров, В.С. Запасский, Магнитный резонанс в спектре шумов фарадеевского вращения, *ЖЭТФ* **81**, 132 (1981).

2. М.М. Glazov, “Electron & Nuclear Spin Dynamics in Semiconductor Nanostructures,” Oxford University Press, 2018.

3. Д.С. Смирнов, В. Н. Манцевич, М.М. Глазов, Теория оптически детектируемых спиновых флуктуаций в наносистемах, *УФН* **191**, 973–998 (2021).

## ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)

УДК 53.043

Н.И. Аверина (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФПЭиН),  
А.А. Ежевский (д.ф.-м.н., проф. каф. ФПЭиН, ННГУ),  
Д.В. Гусейнов (с.н.с., ННГУ),  
А.В. Сухоруков (м.н.с., ННГУ),  
И.А. Зубанов (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФПЭиН),  
Е.А. Калинина (асп., 3 курс, ННГУ, ФПЭиН)

### ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СПИНОВЫХ ТОКОВ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ: $\text{P}_y/\text{Si}:\text{Bi}:\text{P}$ , $\text{P}_y/\text{Si}:\text{Sb}$

В настоящее время активно развивается полупроводниковая спинтроника. Для управления и обнаружения спинового тока представляет интерес спиновый эффект Холла и инверсный спиновый эффект Холла (ИСХЭ). Эффективность преобразований характеризуется углом спин-Холла, являющимся важным параметром для интеграции технологий спинового тока в электронные технологии, основанные на зарядовом токе.

В работе рассматриваются способы генерации спинового тока в n-Si методом спиновой накачки и детектирования с использованием инверсного ИСХЭ, возникающего за счёт рассеяния электронов проводимости, внесённых легированием Si фосфором, на спин-орбитальном потенциале (СОП) Bi, спин-поляризованных с помощью ФМР в слое пермаллоя (Py), нанесённом на Si. Исследование генерации спинового тока позволяет сделать вывод, что внедрение Bi вносит СОП, который приводит к спин-зависимому рассеянию носителей.

Помимо ИСХЭ наблюдается анизотропное магнитосопротивление. Для исследования ИСХЭ снимались угловые зависимости при вращении магнитного поля измеряемого напряжения для разделения сигналов ИСХЭ и АМР, и напыленный слой Py разрезался на 10 полосок для уменьшения вклада АМР примерно в 10 раз.

Вклад в спин-зависимое рассеяние электронов проводимости дают как процессы с переворотом спина, так и без переворота. Поэтому важно было определить параметры, при которых больший вклад дают процессы без переворота спина, что и необходимо для ИСХЭ. Проведены теоретические расчёты величины сигнала ИСХЭ в зависимости от концентрации Bi или Sb и толщины слоя Si для структур, легированных Bi или Sb, которые позволили определить подходящие параметры для структуры n-Si:Bi и показали, что сигнал ИСХЭ для n-Si:Sb очень мал и структура не представляет интерес для дальнейшего исследования.

Из сопоставления экспериментальных данных и теоретических расчётов сделан вывод, что Bi является единственным мелким донором в Si, вносящим достаточное спин-орбитальное взаимодействие, необходимое для генерации спинового тока и его детектирования с помощью ИСХЭ.

1. A. A. Ezhevskii, D. V. Guseinov, A. V. Soukhorukov, A. V. Novikov, D. V. Yurasov, and N. S. Gusev. Spin pump induced inverse spin Hall effect observed in Bi-doped n-type Si. *Phys. Rev. B* 101, 195202 (2020).

В.А. Быков (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФзФ),  
Ю.А. Данилов (к.ф.-м.н., доц., каф. ФПЭН, ННГУ, ФзФ),  
О.В. Вихрова (к.ф.-м.н., с.н.с., НИФТИ ННГУ),  
Ю.А. Дудин (вед. инж., НИФТИ ННГУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ GaAs, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ Mn И Fe

В настоящее время активно изучаются новые способы передачи и обработки информации взамен устоявшихся принципов электроники. Одним из таких направлений является спинтроника, исследующая возможности работы с информацией не движением электрических зарядов, а движением спиновых токов. Ожидается, что приборы, работающие на принципах спинтроники, будут значительно превосходить свои аналоги из традиционной электроники по быстродействию, а также будут обладать гораздо меньшим энергопотреблением.

Одной из ключевых проблем спинтроники является поиск материалов, сочетающих в себе свойства полупроводников и ферромагнетиков. При этом способы получения таких материалов (в связи с необходимостью введения больших концентраций магнитных примесей их называют разбавленными магнитными полупроводниками - РМП) должны быть доступны для массового производства, а сами приборы должны функционировать при температурах выше 77 К. В связи с этим представляет интерес получение РМП методом ионной имплантации с последующим импульсным лазерным отжигом.

В настоящей работе исследованы свойства GaAs, легированного ионами Mn и Fe при различных дозах имплантации и плотностях энергии отжигающего лазерного импульса (использован эксимерный KrF лазер с длительностью импульса 30 нс). Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и отражения исследовано восстановление кристаллической структуры после имплантации. Электрические свойства исследовались с помощью эффекта Холла и его магнитопольевых зависимостей.

Спектры КРС и отражения отожженных образцов показали восстановление кристаллической структуры, нарушенной при имплантации ионов, причем лучшее восстановление наблюдалось для энергии импульса 300 - 400 мДж/см<sup>2</sup>. Для образцов GaAs:Mn на спектрах КРС наблюдается интенсивный пик, связанный с фонон-плазмонной модой, что свидетельствует об высокой электрической активации примеси. Для GaAs:Fe спектры КРС показывают два узких интенсивных пика от TO- и LO-мод GaAs соотношение интенсивностей которых зависит от дозы ионов Fe и энергии лазерного импульса. Эффект Холла показывает, что все образцы имеют p-тип проводимости. При этом лучшие результаты получены для имплантации с дозой  $(3-5) \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и отжига при 300 мДж/см<sup>2</sup>, при этом достигается слоевая концентрация дырок до  $2 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup> для GaAs:Mn и  $4 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> для GaAs:Fe. На магнитопольевых зависимостях сопротивления Холла как для GaAs:Mn, так и для GaAs:Fe наблюдается петля гистерезиса вплоть до температуры 120 К, что однозначно свидетельствует о формировании РМП.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 19-19-00545).

И.П. Вейшторг (студ., 4 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
каф. МНЭ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
А.М. Скоморохов (студ., 4 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
каф. МНЭ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
И.Д. Бреев (асп., 4 год, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
отд. ФТТ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
А.Н. Анисимов (к.ф.-м.н., и.о. н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
отд. ФТТ; САФУ им. М.В. Ломоносова)

## ВЫЖИГАНИЕ ПРОВАЛОВ В СПЕКТРАХ ОДМР КАРБИДА КРЕМНИЯ

Оптически адресуемый, управляемый микроволнами и сохраняющий квантовую когерентность даже при комнатной температуре электронный спин V-центра в SiC может использоваться в качестве датчика. При этом не до конца понятно влияние концентрации собственных изотопов  $\text{Si}^{29}$  и  $\text{C}^{13}$ . В представляемом докладе проведена оценка полуширины линий оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) в изотопно модифицированных кристаллах карбида кремния (SiC). С помощью метода 2-х частотной ОДМР спектроскопии вакансии кремния (V-центры) проанализированы спиновые пакеты V-центров. Первичная интерпретация наблюдаемых эффектов: мы связываем со сверхтонким взаимодействием с изотопами  $\text{C}^{13}$  и  $\text{Si}^{29}$ . Эксперименты выполнены при комнатной температуре. Проведенные эксперименты позволяют оценить возможность динамической поляризации собственных ядер SiC через спиновую поляризацию V-центров [1].

1. Soltamov, V.A., Kasper, C., Poshakinskiy, A.V. et al. Excitation and coherent control of spin qudit modes in silicon carbide at room temperature. Nat Commun 10, 1678 (2019).



В.Е. Захаров (студ. 1 курс маг., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, КЭФ),  
Д.Е. Николичев (к.ф.-м.н., доц., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ФПЭН)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЫ SiO<sub>2</sub> И Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Расчёт плотности электронных состояний в рамках теории DFT - Density of functional theory - упрощает расшифровку фотоэлектронных (ФЭ) спектров и позволяет получить дополнительную информацию из них в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Метод РФЭС, основанный на измерении энергетического спектра электронов, испускаемых с поверхности твёрдого тела под действием ХРИ, в свою очередь, является мощным инструментом анализа структур со слоями нанометровых размеров. В качестве тестируемых материалов были выбраны  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по причине их хорошей изученности.

В работе производилось моделирование ФЭ спектра валентной зоны (ВЗ) путём расчёта парциальной плотности электронных состояний (PDOS) методом Кона-Шэма [1] для построенных элементарных ячеек  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> и  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. После производилось умножение полученной PDOS на соответствующие сечения фотоионизации [2] с последующим размытием 1,2 эВ, которое было определено как аппаратная функция уширения спектрометра.

Экспериментальные спектры записывались на сверхвысоковакуумном комплексе Omicron Multiprobe RM. Давление остаточных газов в аналитической камере составляло не более 10<sup>-9</sup> Торр, эмиссия ФЭ происходила под воздействием немонохроматизированного ХРИ Al K <sub>$\alpha$</sub> . Поверхность структур очищалась химическим методом, и спектры записывались сразу после загрузки образцов. После этого для удаления остаточных загрязнений производилось травление Ag<sup>+</sup> при ускоряющем напряжении 1 кВ и углом пучка относительно поверхности 45°. Спектр ВЗ записывался с шагом по энергии (0,1 эВ) и двухсекундной длительностью набора интенсивности спектра.

Построенные модельные спектры при сравнении их с экспериментальными данными, полученными до травления Ag<sup>+</sup>, для SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показали точное описание ФЭ-линии, соответствующей краю ВЗ (0 – 7,5 эВ по шкале энергии связи, где 0 эВ – уровень Ферми). После травления Ag<sup>+</sup> в экспериментальных спектрах наблюдался сдвиг потолка ВЗ вниз по энергии относительно уровня Ферми без изменения геометрии её края. Значения этих смещений составили 0,3 эВ для SiO<sub>2</sub> и 0,1 эВ для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом модельные спектры с меньшим соответствием описывают полученные экспериментальные данные, что можно связать с нарушением структуры приповерхностного слоя при ионной бомбардировке. Для большей сходимости модельных спектров ВЗ с экспериментальными необходим переход к расчётам, в которых используется набор элементарных ячеек с различной геометрией расположения атомов.

1. Density-Functional Theory / S. Kurth. // E.of Cond. Mat. Phys., 2005. – P. 395-402.
2. Atomic Calculation of Photoionization Cross-Section and Asymmetry Parameters / J.J Yen. // Amsterdam: Gordon and Breach Science Publisher, – 1993. – 314 p.

И.А. Зубанов (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФПЭиН),  
 А.А. Ежевский (д.ф.-м.н., проф., ННГУ, ФПЭиН),  
 Д.В. Гусейнов (с.н.с., ННГУ), А.В. Сухоруков (м.н.с., ННГУ),  
 Н.В. Абросимов (Leibniz-Institut für Kristallzüchtung, Berlin),  
 Е.А. Калинина (асп., 3 год, ННГУ, ФПЭиН), Н.И. Аверина (студ., 1 курс маг., ННГУ,  
 ФПЭиН)

## ДОНОРЫ ЛИТИЯ В ОБЪЕМНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОНОИЗОТОПНЫХ СПЛАВАХ $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$

В настоящее время актуальна разработка квантового компьютера на спиновых кубитах, поэтому возник интерес к донорам в кремнии и твердом растворе кремний-германия, для которых наблюдаются большие времена спиновой релаксации. Одним из таких доноров является литий, имеющий орбитально вырожденное основное состояние, которое можно использовать для эффективного управления спиновыми состояниями электрическими полями. В работе исследованы спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенных методом Чохральского (Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, Germany), на спектрометре Bruker-EMXplus-10/12 X-диапазона (частота 9,6 ГГц). Была получена серия образцов с разным содержанием германия (0.39, 1, 1.2 и 2.9 at%), обогащенных бесспиновыми изотопами  $^{28}\text{Si}$  (99.998%) и  $^{72}\text{Ge}$  (99.984%), легирование литием ( $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) проводилось диффузией при  $300^\circ\text{C}$  в течение 30 мин и фосфором — в процессе роста.

Как оказалось, в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  донорный центр лития вследствие высокой подвижности занимает наиболее устойчивые междоузельные положения, в которых атомы германия понижают симметрию до аксиальной (тригональной) с осью симметрии [111]. Значения g-факторов уменьшаются при увеличении концентрации германия, что, по-видимому, связано с увеличением спин-орбитального вклада в g-факторы от атомов германия.

Из экспериментов по насыщению спектров ЭПР при  $T=4\div 30\text{K}$  получено, что скорость спиновой релаксации электрона, локализованного на донорах лития, при низких температурах соответствует модели с участием состояний двухъямного потенциала ( $\frac{1}{T_1} \sim T^2$ ) [1]. Литий может находиться в разных адиабатических состояниях, между которыми существует фононная связь. Фононы индуцируют кроссрелаксационные переходы между зеемановскими подуровнями и состояниями двухъямного потенциала с переворотом спина. Данный механизм релаксации возможен, так как в  $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ : Li атомы Ge создают нерегулярную кристаллическую решётку. Германий создает напряженные состояния в центральной ячейке, в которую встраиваются атомы лития. Такой механизм дает существенный канал спиновой релаксации при низких температурах.

1. Sousa R. Dangling-bond spin relaxation and magnetic 1/f noise from the amorphous-semiconductor/oxide interface // Phys. Rev., 2007. В 76, 245306.

СЛОИ МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА НА ОСНОВЕ ТРОЙНОГО ТВЕРДОГО  
РАСТВОРА In(As,Sb), СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОГО Fe

Исследования, проведенные в последнее десятилетие, показали, что на основе полупроводников  $A^3B^5$ , сильно легированных Fe, можно создать эпитаксиальные слои магнитных полупроводников с температурой Кюри выше комнатной. Например, получены полупроводниковые слои (Ga, Fe)Sb [1], (In,Fe)Sb [2] и (Ga,Fe)As [3] с температурой Кюри не менее 300 К. Механизм возникновения ферромагнетизма в слоях  $(A^3,Fe)B^5$  в настоящее время является предметом исследований. Представляет интерес расширение диапазона материалов  $A^3B^5$ , легированных Fe, для исследования влияния ширины запрещенной зоны, концентрации и типа носителей заряда на возникновение ферромагнетизма. Для этого можно использовать тройные твердые растворы, в частности In(Sb,As), (In,Ga)Sb, (In,Ga)As, легированные Fe, для которых существуют крайние бинарные соединения, исследуемые в настоящее время ((In,Fe)As, (Ga,Fe)Sb, (In,Fe)Sb и (Ga,Fe)As).

В настоящей работе было проведено исследование системы In(As,Sb):Fe с целью выявления влияния типа элемента V группы (As или Sb) на ферромагнитные свойства полученного магнитного полупроводника. Методом импульсного лазерного распыления твердотельных мишеней InSb, InAs, Fe в вакууме при температуре 200 °C на подложках *i*-GaAs были получены слои тройного полупроводникового соединения In(AsSb) различного состава, а также слои In(AsSb), сильно легированные железом. Исследования рентгеновской дифракции показали, что слои In(As,Sb) и In(As,Sb):Fe являются эпитаксиальными, и наблюдается зависимость постоянной решетки от количества введенной Sb, т.е. получены твердые растворы системы In(As,Sb). Спектры оптического отражения демонстрируют сдвиг характеристических оптических переходов от InSb к InAs с увеличением соотношения As к Sb. Исследования магнитотранспортных свойств показали, что сдвиг состава слоя In(As,Sb):Fe в сторону (In,Fe)As приводит к ослаблению магнитных свойств, подобно тому, как они проявляются в (In,Fe)As (начинает преобладать нормальный эффект Холла). Таким образом, можно заключить, что величина обменного взаимодействия в системе In(As,Sb):Fe ослабевает с увеличением концентрации атомов As в подрешетке элементов V-группы.

1. N.T. Tu et al., *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 132402 (2014).
2. A.V. Kudrin et al., *J. Appl. Phys.*, **122**, 183901 (2017).
3. A.V. Kudrin et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **35** 125032 (2020).

К.С. Кабаев (студ., 6 курс, ННГУ, физ. фак., каф. теор. физ.)  
Д.В. Хомицкий (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, каф. теоретической физики)

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ $\text{CoSi}_2$

Проводятся исследования коэффициента теплопроводности кремниевых структур, содержащих наноразмерные включения силицидов кобальта. Нановключения сформированы методом ионной имплантации с последующим высокотемпературным отжигом. Показано, что формирование нановключений в Si матрице позволяет в несколько раз понизить значение коэффициента теплопроводности по сравнению со значением для объёмного кремния, что делает метод имплантации и отжига привлекательным для модификации свойств термоэлектрических материалов. Тонкие термоэлектрические плёнки занимают значительное место в ряду новых материалов с улучшенными характеристиками.

Экспериментальные исследования показывают [1], что ионная имплантация атомов кобальта обуславливает снижение на порядок значений теплопроводности, что связывается со снижением кристаллического совершенства имплантированной области. Высокотемпературный отжиг обеспечивает восстановление кристаллического качества и соответствующее увеличение теплопроводности относительно структуры без отжига. При этом во всём диапазоне температур значения коэффициента теплопроводности остаются в  $\approx 2$  раза ниже, чем для исходной структуры.

Используя теоретическую модель, развитую в работе [2], были рассчитаны зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры для трёх различных структур. Первая структура – чистый кремний, вторая структура – кремний с нанокластерами  $\text{CoSi}_2$ , третья структура – кремний с нанокластерами после отжига. Теоретическая модель с хорошей точностью описывает экспериментальные данные, что мы можем наблюдать на зависимостях теплопроводности от температуры.

1. М.В. Дорохин, Ю.М. Кузнецов, П.Б. Дёмина, Ю.А. Дудин, А.В. Здравейцев, Р.Н. Крюков, И.В. Ерофеева, В.Е. Котомина, «Управление коэффициентом теплопроводности тонких термоэлектрических плёнок с помощью ионной имплантации и термического отжига», Труды XXV Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», 9-12 марта 2021, Нижний Новгород, Том 2, с.644.

2. L. Ferrer-Argemi, Z. Yu, and J. Lee, «Effects of metal silicide inclusion interface and shape on thermal transport in silicon nanocomposites», J. Appl. Phys. 126, 035106 (2019).

В.О. Козлов (студ., 6 курс, СПбГУ, каф. физики твердого тела),  
И.И. Рыжов (к.ф.-м.н., ст. пр., СПбГУ, каф. фотоники)

## ХАРАКТЕРИСТИКА АНИЗОТРОПНЫХ ЦЕНТРОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ СПИНОВОГО ШУМА С УГЛОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Анизотропным центром называют дефект кристаллической решетки, который проявляет анизотропные свойства, откликаясь на оптическое, магнитное и другие возмущения [1]. Информация о структуре и ориентации анизотропных центров в твердых телах имеет важное значение для магнитооптических и оптоэлектронных приложений современной науки. На данный момент существует множество методов изучения анизотропных центров: фотохимическое анизотропное обесцвечивание кристаллов [2], поляризационная люминесценция, пьезоспектроскопический эффект, методы магнитного резонанса и другие.

В настоящей работе демонстрируется модификация метода спектроскопии спиновых шумов - магнитооптического метода измерения парамагнитного резонанса, давно зарекомендовавшего себя для исследования полупроводников [3] и недавно примененного к активированным кристаллам [4]. Использование вращаемого постоянного магнита для создания постоянного по величине, но меняющего направление магнитного поля, позволяет определить ориентацию анизотропных центров в кристалле или компоненты  $g$ -тензора этих центров.

Экспериментальная проверка техники проводилась на кубическом объемноцентрированном кристалле  $\text{CaF}_2\text{-Nd}^{3+}$  с 1 мол % примеси. Была подобрана методика определения компонент  $g$ -тензора анизотропного центра в основном состоянии. Обнаружено, что в кристалле формируются преимущественно тетрагональные АЦ, соответствующие локальной симметрии  $C_4$ , о чем свидетельствует экспериментально полученная зависимость флуктуационного спектра от азимута приложенного поля. Анализ полученного спектра позволил определить  $g_{\perp}$  и  $g_{\parallel}$  для одноосных тетрагональных анизотропных центров Nd.

Применимость этой техники не ограничивается примесными кристаллами, выбранными только для наглядной демонстрации, и распространяется на любые изотропные среды, содержащие магнитные центры.

1. P.P. Feofilov, A. A. Kaplyansky, Usp. fiz. nauk, 76, 201–238 (1962).
2. M. Ueta, J. Phys. Soc. Japan 7, 107 (1952).
3. Crooker S.A. and other, Nature, 431, 49–52 (2004).
4. A.N. Kamenskii and other, Phys. Rev. Research, 2, 023317 (2020).

А.Е. Рудоминский (студ., 2 курс маг., СПбПУ, ИЭИТ),  
Д.В. Денисов (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФДП),  
Н.Ю. Михайлин (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФДП),  
Д.В. Шамшур (д.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФДП)

## ИЗМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Te}$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ СВИНЦА

В серии полупроводниковых твердых растворов  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  при содержании индия, превышающем  $x > 0.02$ , наблюдается переход в сверхпроводящее (СП) состояние. Критические параметры СП перехода (температура  $T_c$  и магнитное поле  $H_{c2}$ ) на порядок больше значений для известных полупроводниковых соединений со сравнимой концентрацией носителей заряда и достигают  $T_c < 4.7$  К и  $H_{c2}(0) < 40$  кЭ [1, 2]. Увеличенные критические параметры связаны с расположением уровня Ферми в примесной полосе индия на фоне сложного зонного спектра соединения, характеризующегося наличием дополнительного экстремума в  $\Sigma$ -точке зоны Бриллюэна. Т. к. критические параметры сверхпроводящего перехода увеличиваются при росте содержания индия в твердом растворе, для исследования были отобраны образцы с концентрацией In  $x = 0.2$  (в пределах его растворимости в  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ ). Отметим, что при низких температурах соединения могут проявлять свойства топологического изолятора [2].

В настоящей работе изучены температурные ( $T = 300 - 0.4$  К) зависимости удельного сопротивления  $\rho(T)$  поликристаллических образцов  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Te}$  с содержанием свинца  $0.1 \leq z \leq 0.9$ . Для составов с  $z = 0.1 \div 0.4$  зависимости характеризуются металлическим ходом удельного сопротивления с дальнейшим переходом соединения в СП состояние.  $T_c$  твердого раствора увеличивается с ростом содержания свинца  $T_c = 2.9 - 4.1$  К. В  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Te}$  с  $z = 0.6 \div 0.9$  при  $T < 150$  К наблюдается выраженный экспоненциальный рост удельного сопротивления с понижением температуры  $\rho = \rho_0 \cdot \exp(-E_A/(kT))$ , где  $E_A$  – энергия активации. Энергия активации  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Te}$  возрастает с  $E_A = 3.1$  мэВ при  $z = 0.6$  до  $E_A = 9.7$  мэВ при  $z = 0.9$ , что может быть связано с увеличением энергетического барьера между зонными и примесными состояниями. В области низких температур  $T < 4$  К в образцах с  $z = 0.6 \div 0.9$  наблюдается уменьшение сопротивления  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{Te}$ , которое может быть вызвано переходом от объемной проводимости к проводимости по поверхностным состояниям. Отметим, что образец с  $z = 0.5$  демонстрирует слабый экспоненциальный рост удельного сопротивления с  $E_A = 0.7$  мэВ с последующим СП переходом, характеризующимся наибольшими для исследуемой серии критическими параметрами  $T_c = 4.1$  К и  $H_{c2}(0) = 40$  кЭ.

1. R.V Parfenev, D.V. Shamshur, S.A Nemov, Phys. Solid State 43 (2001) 1772.
2. R. Zhong, J. Schneeloch, Q. Li, W. Ku, J. Tranquada, G. Gu, Crystals 7 (2017) 55.

М.С. Трофимов (студ., 1 курс маг., Томский ГУ, КПЭ),  
И.Д. Щербаков (асп., 4 год, м.н.с., R&D центр ПТМ ТГУ)

## ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ С ГЛУБОКИМИ ЦЕНТРАМИ ХРОМА

На сегодняшний день для изготовления детекторов ионизирующих излучений широко используется арсенид галлия, выращенный по технологии LEC (Liquid encapsulated Czochralski technique) и компенсированный хромом в процессе диффузии. Экспериментальные значения удельного сопротивления таких структур составляют порядка ( $10^8$ - $10^9$ ) Ом · см, что позволяет достичь низкого уровня темнового тока и изготавливать детекторы с высоким соотношением сигнал-шум.

Одним из важнейших параметров, определяющих эффективность работы детекторов ионизирующих излучений, является дрейфовая подвижность носителей заряда. Поэтому целью исследования являлось определение данного электрофизического параметра в HR-GaAs:Cr структурах (HR – High Resistivity) времяпролетным методом монополярного дрейфа и методом Ван дер Пау.

С помощью экспериментальной установки метода монополярного дрейфа были получены импульсы электронного и дырочного фототока. Анализ импульсов фототока, наводимого дырками, показал, что определение их времени пролёта по уровню ПШПВ (полная ширина на половине высоты) не представляется возможным. Соответственно не представляется возможным расчёт дрейфовой скорости и подвижности. Это связано с тем, что в данном эксперименте использовалась модель однородного распределения напряженности электрического поля по активной области детектора, которая не учитывала перезарядку глубоких уровней. Используя метод Ван дер Пау, удалось дать приближенную оценку дырочной подвижности в исследуемых HR-GaAs:Cr структурах. Таким образом, результаты эксперимента получились следующими:

1) На основе зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля рассчитано среднее значение дрейфовой подвижности электронной компоненты для каждой из HR-GaAs:Cr пластин: ( $3530 \pm 210$  и  $3740 \pm 110$ )  $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  для пластины №1 и №2, соответственно.

2) На основе полученных электрофизических характеристик в методе Ван дер Пау была рассчитана подвижность электронов в HR-GaAs:Cr материале, значение которой составило ( $3680$  и  $3940$ )  $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  для пластины №1 и №2, соответственно. Установлено, что подвижность дырочной компоненты в 15 – 20 раз меньше относительно электронов и составляет  $\approx 250 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

### МАГНИТНЫЙ ЦИРКУЛЯРНЫЙ ДИХРОИЗМ В СЛОЯХ GaAs:Fe

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) на основе полупроводников  $A^3B^5$ , сильно легированные Fe, такие как (Ga,Fe)Sb и (In,Fe)Sb, являются перспективными материалами для полупроводниковой спинтроники, поскольку они имеют температуру Кюри выше комнатной. Одним из основных методов установления связи ферромагнетизма РМП с его полупроводниковой матрицей является метод исследования магнитного циркулярного дихроизма (МЦД).

В данной работе представлены исследования МЦД в слоях GaAs:Fe. Слои выращивались методом импульсного лазерного напыления на *i*-GaAs. Температура подложки варьировалась в диапазоне 200 – 350 °С. Концентрация железа достигала 20 ат. %.

Эффект МЦД позволяет определить, связан ли ферромагнетизм с полупроводниковой матрицей РМП или с включениями второй магнитной фазы. Суть метода состоит в том, что на поверхность образца падает свет с правой и левой круговой поляризацией, отражённый от образца свет попадает в детектор, который выдаёт величину пропорциональную эффекту МЦД. Для разных энергий света были получены зависимости величины МЦД магнитного поля (рис.1). С использованием магнитолевых зависимостей была получена спектральная зависимость величины МЦД от энергии фотонов (рис.2).

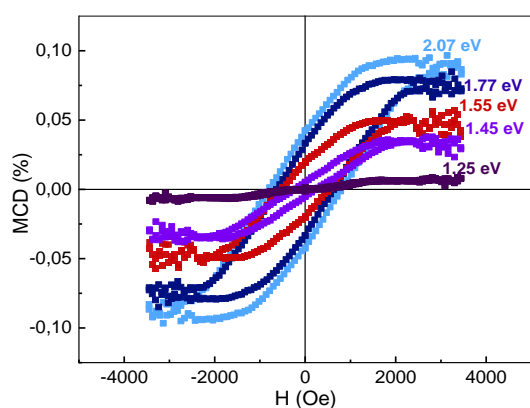


Рис. 1. Зависимости величины МЦД от магнитного поля для слоя GaAs:Fe

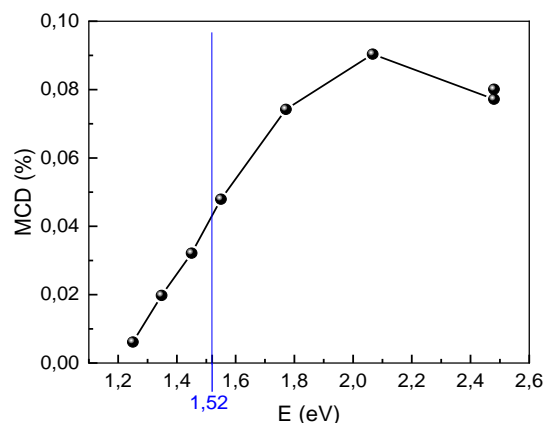


Рис. 2. Спектральная зависимость величины МЦД от энергии фотонов для слоя GaAs:Fe

При энергии фотонов меньше ширины запрещённой зоны GaAs наблюдается сильный спад величины МЦД, который подтверждает связь ферромагнетизма в полученных слоях GaAs:Fe с полупроводниковой матрицей, а не с включениями второй фазы. Наличие второй фазы в слое привело бы к иному виду спектральной зависимости, не имеющей особенности вблизи энергии, характерной для межзонного перехода GaAs.



В.В. Яковлева (студ., 1 курс маг., ИТМО, ФизФ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
И.Д. Бреев (асп., 4 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
А.Н. Анисимов (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе; САФУ им. М.В. Ломоносова)

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ NV-ЦЕНТРОВ В ДВУХ ТИПАХ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ И ИХ ОДМР СПЕКТРЫ

Алмаз является одним из наиболее перспективных минералов и имеет множество применений в промышленности. Среди его парамагнитных дефектов особое место занимает хорошо известный NV-центр, который представляет собой замещающий атом азота, связанный с вакансией углерода. Центр имеет яркую люминесценцию в видимой области спектра с нуль фонной линией 637 нм [1]. Он также обладает уникальными спиново-оптическими свойствами, позволяющими используя метод оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) выстраивать спины в условиях окружающей среды.

Используя метод ОДМР, нами были изучены два типа природных алмазов, один из которых был облучен протонами, а второй не был подвержен какой-либо обработке. Исследовалось распределение интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) NV-центров вдоль поверхности образцов, а также были зарегистрированы и проанализированы спектры ОДМР в разных точках поверхности. Сканирование интенсивности ФЛ проводилось с помощью лазера возбуждения ( $\lambda = 532$  нм,  $P = 5$  МВт), ПЗС камеры, пьезосканера и конфокальной оптической системы ( $NA = 0.75$ , 100x). Оптическое детектирование магнитного резонанса выполнялось с использованием фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) для детектирования интенсивности ФЛ в области спектра 550-700 нм, микроволновой антенны и генератора СВЧ, низкочастотного генератора для микроволновой амплитудной модуляции и синхронного детектора.

Была выявлена заметная разница в распределении и свойствах NV-центров в образцах. Так, в образце, подверженном облучению протонами, наблюдается однородное распределение NV-центров, в то время как в необработанном образце их распределение наблюдается в виде периодических полос, направленных в одном направлении. В полученных спектрах ОДМР было обнаружено, что в первом образце параметры ОДМР по всей поверхности оставались неизменными, а во втором образце они изменялись в зависимости от выбранной точки.

Полученные результаты могут прояснить особенности создания NV-центров в природных алмазах для дальнейшего повышения их применимости и воспроизводимости для применения в области квантовых технологий. Кроме того, картина распределения NV-центров в природных необработанных алмазах может пролить свет на процессы геологического образования алмазов.

1. F. Jelezko, J. Wrachtrup. Single defect centres in diamond // Phys. stat. sol. № 13. – 2006. – P. 3207-3225.

М.В. Захарченко (асп., 1 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## ЗОННАЯ СТРУКТУРА И БИОРТОГОНАЛЬНЫЕ СОБСТВЕННЫЕ МОДЫ ДИССИПАТИВНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Фотонные кристаллы представляют собой разновидность метасред с периодическим изменением в пространстве диэлектрической или магнитной проницаемостей. Подобные структуры характеризуются определённым набором собственных электромагнитных мод и соответствующим законом дисперсии. Для таких сред характерно наличие диапазонов разрешённых и запрещённых значений частот, т.е. зонной структуры. На практике при анализе собственных мод любой реальной физической системы возникает необходимость учёта потерь энергии, которые неизбежно приводят к изменению пространственного распределения электромагнитного поля и зонной структуры фотонного кристалла.

Математически введение диссипации в подобной системе приводит к необходимости решения неэрмитовой задачи при определении собственных частот уравнений Максвелла [1]. Принципиально, что при этом нарушается ортогональность собственных электромагнитных мод, а соответствующие собственные частоты становятся комплексными. Наличие потерь, как правило, описывается приближенно с помощью теории возмущений [1], где в качестве нулевого приближения используется ортогональный набор собственных мод системы без потерь. Однако существует более общий и универсальный подход к решению подобных задач, основанный на использовании биортогональных базисов [2,3].

Настоящая работа посвящена анализу закона дисперсии и собственных электромагнитных мод фотонных кристаллов на основе диссипативных сред. В работе используется операторное представление уравнений Максвелла, аналогичное [4]. Решение задачи при этом сводится к поиску собственных векторов и собственных значений неэрмитового оператора  $\hat{M}$  и сопряжённого ему оператора  $\hat{M}^+$

$$\hat{M} |R_v\rangle = \lambda_v |R_v\rangle, \quad \hat{M}^+ |L_v\rangle = \lambda_v^* |L_v\rangle.$$

Определяемые таким образом два набора собственных векторов  $|R_v\rangle$  и  $|L_v\rangle$  удовлетворяют следующим условиям биортонормированности и полноты

$$\langle L_v | R_{v'} \rangle = \delta_{vv'}, \quad \sum_v |R_v\rangle \langle L_v| = 1.$$

Показано, что с их помощью электромагнитное поле в фотонном кристалле с потерями может быть представлено в виде линейной комбинации диссипативных собственных мод.

1. P. T. Kristensen, *et al.*, *Adv. Opt. Photon.* **12**, 612 (2020).
2. B. Vial, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **31**(6), 1339 (2014).
3. D. C. Brody, *J. Phys. A: Math. Theor.* **47**, 035305 (2014).
4. G. F. Glinskii, *Tech. Phys.* **64**, 293 (2019).

Д.А. Конюх (асп., 1год, и.о. м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Я.М. Бельтюков (к.ф.-м.н., и.о. зав. сек., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## ВЯЗКОУПРУГИЕ ЭФФЕКТЫ ПАМЯТИ И ПЕРЕХОД ИОФФЕ-РЕГЕЛЯ В АМОΡФНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

В современной теории конденсированных сред исследование аморфных наноструктур и нанокомпозитов является одним из самых востребованных разделов. Известно, что на масштабе нескольких нанометров в аморфных и полимерных структурах проявляется существенная неоднородность локальных деформаций [1]. Такие микроскопические неаффинные смещения определяют макроскопические частотно-зависимые комплексные вязкоупругие модули. Протекающие при этом вязкоупругие процессы колебаний играют ключевую роль в механизмах теплопроводности аморфных диэлектриков. Доминирующий вклад в теплопроводность стекол составляют колебания диффузионной природы, которые распространяются по системе путем передачи энергии от атома к атому. Эти диффузионные колебания занимают область выше порога Иоффе-Регеля, но ниже порога локализации [2]. Несмотря на важную роль диффузионных колебаний в протекании процессов релаксации, этот вид колебаний является малоизученным.

При описании вязкоупругой релаксации в аморфных твердых телах, наряду с жидкими средами, необходимо учитывать эффекты памяти флуктуаций плотности вещества [3]. В данной работе демонстрируется, что в гармоническом приближении в отсутствие изначальной диссипации энергии вязкоупругая релаксация колебаний может быть описана с помощью общих моделей упругих сред с некоторой функцией памяти. Разработанные в рамках данной работы модели способны воспроизвести переход Иоффе-Регеля от баллистического типа распространения колебаний к диффузионному, а также отразить эффекты памяти, наблюдаемые в неупорядоченных средах. При этом с помощью теории случайных матриц удастся найти функцию памяти в аналитическом виде. Полученное уравнение движения профиля смещений атомов содержит запаздывающую во времени часть и описывает диффузию колебаний выше порога Иоффе-Регеля. Ранее теория случайных матриц успешно применялась для описания основных универсальных колебательных свойств неупорядоченных систем [4, 5].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-72-20201.

1. F. Leonforte et al., *Phys. Rev. B*, **72**, 224206 (2005).
2. P.B. Allen, J.L. Feldman, *Phys. Rev. B*, **48**, 12581 (1993).
3. J.-P. Hansen, I.R. McDonald, *Theory of Simple Liquids* (Elsevier, Amsterdam, 1990).
4. Y.M. Beltukov, V.I. Kozub, D.A. Parshin, *Phys. Rev. B*, **87**, 134203 (2013).
5. D.A. Conyuh, Y.M. Beltukov, *Phys. Rev. B*, **103**, 104204 (2021).

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕМ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ В ДИАПАЗОНЕ 0.44-0.75 МКМ НЕЛЕГИРОВАННОГО  
И ЛЕГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОМ CVD- ZnSe

В работе детально исследуются влияния пространственное распределение люминесцентных характеристик CVD-ZnSe, легированного алюминием и железом методом термодиффузии. Легирование проводилось в условиях горячего изостатического прессования (HIP) при температурах  $T = 1250$  и  $-1200$  °С и давлениях аргона в камере  $P = 1000$  и  $950$  МПа и диффузии с поверхности при температуре  $1000$  °С в атмосферах аргона и цинка. Пространственное распределение люминесценции регистрировалось с помощью двухфотонной конфокальной микроскопии (1) Обнаружено, что все методики легирования алюминием, используемые в данной работе, приводят к образованию в кристаллах двух областей. Первая область - область с большей концентрацией алюминия. В ней доминирует люминесценция примесно-дефектных центров (ПДЦ), характерных для ZnSe, легированного алюминием (1). Вторая область с меньшей концентрацией алюминия. В ней доминирует экситонная люминесценция и отсутствует люминесценция указанных выше ПДЦ.

Установлено, что границы этих областей, регистрируемые с помощью люминесценции, носят резкий, нетипичный для диффузионных процессов характер. Переходная зона представляет собой полосу шириной  $\sim 10$  мкм параллельную поверхности, с которой шло легирование алюминием, с высокой интенсивностью люминесценции экситона. Эта полоса искривляется в случае ее пересечения границей зерен. Этот результат объясняется в предположении аномального характера диффузии алюминия, приводящего к резкому изменению концентрации алюминия на некотором расстоянии от поверхности, с которой проводилось легирование. Так же обнаружено, что применяемая в данной работе методика легирования алюминием кристаллов ZnSe ослабляет известный эффект подавления железом люминесценции ZnSe в видимом диапазоне.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-20048 и в части, связанной с разработкой технологии и изготовлении образцов, работа поддержана грантом РНФ №19-13-00205.

1. В.П. Калинушкин, О.В. Уваров «Возможности двухфотонной конфокальной микроскопии для исследования объемных характеристик полупроводниковых материалов» // Журнал технической физики. – 2016. – Т.86, Вып. 12. – С. 119–123.
2. G.N. Ivanova, D.D. Nedeoglo, N.D. Negeoglo, V.P. Sirkeli, I.M. Tiginyanu, V.V. Ursaki «Interaction of intrinsic defects with impurities in Al doped ZnSe single crystals» // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101. – P. 063543.

А.Ш. Хачатрян (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Е.В. Чарная (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ),  
В.В. Марченков (д.ф.-м.н., проф., УрФУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ $\text{Vi}_2\text{Se}_3$ , ЛЕГИРОВАННЫХ ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

В последнее время активно исследуются топологические изоляторы (ТИ), содержащие примеси парамагнитных ионов, способные индуцировать магнитные фазовые переходы. Предполагается, что парамагнитные примеси могут нарушать симметрию относительно обращения времени, что даёт возможность контролировать транспортную спиновую поляризацию и наблюдать относительно высокотемпературный квантовый аномальный эффект Холла [1].

В настоящей работе с помощью СКВИД– магнитометрии исследовались магнитные свойства объемных ТИ  $\text{Vi}_{1.94}\text{Fe}_{0.06}\text{Se}_3$  и  $\text{Vi}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Se}_3$  с  $x=0.1, 0.3$  и  $0.6$ , выращенных методом Бриджмена – Стокбаргера. Производилось тестирование поверхности образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа. Картирование поверхности кристаллов продемонстрировало достаточно однородное распределение примесей железа и хрома.

В ходе работы были измерены полевые зависимости  $dc$  намагниченности в полях напряженностью до 70 кОе и температурные зависимости в ZFC и FC режимах с минимальной температурой 2 К. Измерения производились в двух ориентациях монокристаллических образцов:  $c\parallel\mathbf{H}$  и  $c\perp\mathbf{H}$ . Монокристаллические образцы обладают выраженной магнитной анизотропией, которая наблюдалась на температурных зависимостях магнитной восприимчивости и коэрцитивной силы. Исследования показали, что в кристалле  $\text{Vi}_{1.94}\text{Fe}_{0.06}\text{Se}_3$  сосуществует ферромагнитное и антиферромагнитное упорядочение наряду с парамагнетизмом. В кристаллах  $\text{Vi}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Se}_3$  с  $x=0.01$  доминирует ферромагнитный порядок, а с  $x=0.03$  и  $0.06$  основным является антиферромагнитный характер упорядочения. На фоне магнитоупорядоченной фазы кристаллов  $\text{Vi}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Se}_3$  проявляется парамагнетизм, который заметен при температуре ниже примерно 25 К. Следует предположить, что парамагнетизм обусловлен ионами хрома, которые не участвуют в обменном взаимодействии. В области температур, соответствующих парамагнитному состоянию исследуемых кристаллов в поле 50 кОе, температурная зависимость магнитной восприимчивости описывалась законом Кюри – Вейса. Температуры Кюри – Вейса отрицательны для всех образцов, а полученные значения эффективного спина указывают на смешанные валентные состояния железа и хрома [2, 3].

1. D. Pesin, A.H. MacDonald. Nature Mater. **11**, 3305 (2012).
2. E. V. Shevchenko, et al., Phys. Solid State **61**, 1037 (2019).
3. A. Sh. Khachatryan, et al., Europhys. Lett. **134**, 47002 (2021).

А.А. Хомич (к.ф.-м.н., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
В.В. Кононенко (д.ф.-м.н., ИОФ им. А.М. Прохорова РАН)

## СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ АЛМАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Неослабевающий интерес к изучению алмаза объясняется как уникальной комбинацией его свойств, так и его способностью перестраивать структуру под внешним воздействием, что позволяет в принципе, при наличии подходящего инструмента, конструировать структуру материала на наноуровне с заданными свойствами. Алмаз обладает сверхплотной кристаллической решеткой, поэтому ионная имплантация, облучение электронами и нейтронами являются наиболее эффективными технологиями инженерии дефектов. Интенсивное лазерное излучение применяется для задач локальной модификации структуры и поверхностных свойств алмаза с целью создания новых полностью углеродных структур для фотоники и электроники [1].

В работе исследованы процессы графитизации радиационно-модифицированного алмаза в результате воздействия мощного фемтосекундного УФ (длина волны 266 нм) лазерного излучения. В одноимпульсном режиме на (111) грани облученного реакторными нейтронами (флюенс  $2.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ) природного алмаза сформировано несколько серий пятен с изменением плотности энергии (в центре) пятна от единиц до нескольких десятков Дж/см<sup>2</sup>. Выбор ориентации алмаза определялся тем, что наиболее энергетически выгодный механизм графитизации алмаза - преобразование трех алмазных плоскостей {111} в две графитовые базальные плоскости. В работе [2] было продемонстрировано, что при облучении алмазной грани (111) фемтосекундными УФ лазерными импульсами могут быть реализованы режимы одноимпульсного воздействия, при которых наблюдается резкое улучшение кристаллического совершенства графитизированного слоя, приближающегося по своей структуре к высокоупорядоченному графиту.

Методом конфокальной спектроскопии комбинационного рассеяния в режиме сканирования вдоль диаметра графитизированных пятен исследованы трансформации структуры материала, формирующегося вблизи поверхности исходного радиационно-поврежденного алмаза. Установлена величина порога лазерной графитизации облученного быстрыми нейтронами алмаза ( $0.6 \text{ Дж/см}^2$ ), что примерно в 5 раз меньше, чем у необлученного алмаза. В докладе обсуждаются основные закономерности немотонного изменения структуры графитизированного излучением слоя в облученных нейтронами алмазах в зависимости от интенсивности лазерного излучения, в том числе в сопоставлении с измерениями на грани (111) в необлученном природном алмазе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-72-00122.

1. Углеродная фотоника / ред. В.И. Конов. - М.: Наука, 2017. - 327 с.
2. V.V. Kononenko, A.A. Khomich et al., *Appl. Phys. Lett.*, **114**, 251903 (2019).

## ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)

УДК 620.187.3:548.5

А.И. Андрианов (студ., 2 курс. маг., ННГУ, каф. ФПЭН),  
Д.А. Павлов (д.ф.-м.н., проф., ННГУ, каф. ФПЭН),  
А.А. Сушков (асп., 4 год, ННГУ, каф. ФПЭН)

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАТФОРМ Ge/Si/SOI ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ СТРУКТУР

Интеграция полупроводников  $A^3B^5$  в Si технологию будет способствовать удешевлению приборов, увеличению быстродействия и скорости передачи информации. А использование подложек КНИ позволит сделать радиационно-стойкие активные излучающие устройства, которые бы в перспективе использовались в космической и военной отраслях промышленности. Одной из технологий совмещения полупроводников  $A^3B^5$  с Si технологиями является эпитаксиальное выращивание материалов  $A^3B^5$  на подложках Si [1] и КНИ через буферные слои Ge/Si. Одним из методов выращивания данных буферных слоёв является метод молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако, при формировании буферных слоёв Ge/Si неизбежно будут возникать деформации из-за рассогласования в параметрах постоянной решётки Si и Ge, которое составляет 4%. При разработке приборов на основе данных структур нужно минимальное наличие дефектов в слоях, чтобы в лазере преобладали процессы излучательной рекомбинации над безызлучательной.

В настоящей работе произведены попытки роста буферных слоёв Ge/Si методом молекулярно пучковой эпитаксии на установке УВН 83П1 по запатентованной методике роста слоёв Ge (RU165625U1) на подложке Si и контроль качества слоёв методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM-2100F (200 кВ). Были получены обзорные ПЭМ–снимки структуры Ge/Si, а также увеличенные снимки высокого разрешения от гетерограницы Ge/Si, по которым были определены толщины слоёв и произведена оценка структурного совершенства. На гомогранице между Si-подложкой и буферным слоем Si была идентифицирована перестройка алмазоподобной конфигурации кремния в гексагональную и рассчитаны межплоскостные расстояния в кристаллографическом направлении (111). Было измерено расстояние проникновения дефектов в слой Ge – 127 нм, а также толщина слоя Si – (134±9) нм. Также с помощью ПО Gatan Digital Micrograph и метода «геометрической фазы» была построена карта распределения деформаций на гетерогранице Ge/Si и измерена толщина релаксационного слоя, которая составляет 14 нм.

Проведённый анализ выращенных структур методом ПЭМ указывает на тот факт, что требуется дальнейшее развитие технологии роста слоев Ge/Si с целью устранения гексагонализации на гомогранице Si и уменьшения глубины проникновения дефектов в слое Ge.

1. N. Baidus, V. Aleshkin, A. Dubinov *et al.* // Crystals, V. 8, 311 (2018).

Д.Б. Богомолов (студ., 2 курс маг., Новосибирский ГТУ, каф. ППИМЭ),  
М.О. Петрушков, М.А. Путято, А.В. Васев,  
В.В. Преображенский (ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова)

### МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ GaSb НА ВИЦИНАЛЬНЫХ ПОДЛОЖКАХ Si(001): ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЗАРОЖДЕНИЯ ПЛЕНОК GaSb(001) И GaSb(00-1) НА ИХ СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящее время актуальной задачей является разработка технологии получения тонких высококачественных буферных слоев GaSb на дешевых и прочных подложках Si(001). Применение гибридных подложек GaSb/Si(001) позволит значительно снизить стоимость оптоэлектронных приборов на основе  $A^{III}Sb$  и обеспечит им широкий круг применений в специальных задачах наблюдения, наведения, охраны объектов, контроля состава воздушной среды и т.д., в которых не требуется реализация предельных характеристик устройств.

В данной работе проведено исследование влияния состава и условий формирования переходных слоев между подложкой кремния и эпитаксиальной пленкой GaSb на ее свойства. Выращены пленки GaSb(001) и GaSb(00-1) на подложках Si(001), отклоненных на  $6^\circ$  к плоскости (111). Пленки формировались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на переходных слоях AlSb/As/Si и GaP/Si. Ориентация пленок GaSb задавалась ориентацией димеров мышьяка и фосфора относительно краев террас вицинальной подложки.

Сопоставление структурных свойств пленок GaSb с составом и условиями формирования переходных слоев показало, что кристаллическое совершенство образцов определяется взаимодействием системы дислокаций несоответствия с системой антифазных доменов (АФД) и практически не зависит от ориентации эпитаксиальных слоев ((001) или (00-1)). Строение, плотность, размеры и распределение по толщине пленки АФД зависят от состава, условий и механизма формирования первых атомных слоев соединений  $A^{III}B^V$  на Si. Наиболее структурно совершенные пленки GaSb были получены с использованием переходных слоев GaP в условиях, когда первым на поверхности кремния формируется слой димеров фосфора.

Анализ AFM-данных позволил выявить наличие четко выраженной анизотропии рельефа поверхности у всех образцов. Ориентация основных элементов морфологии поверхности совпадает с направлением краев террас  $[-110]$  и не зависит от состава и способа формирования переходного слоя. Ориентация пленки ((001) или (00-1)) оказывает влияние преимущественно на протяженность и высоту рельефа. Пленки GaSb с ориентацией (00-1) характеризуются более гладкой поверхностью.



П.В. Жихарев (студ., 6 курс, Новосибирский ГТУ, каф. ППиМЭ),  
Н.Л. Шварц (к.ф.-м.н., доц., ИФП СО РАН, НГТУ, каф. ППиМЭ)

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПЛЁНКИ-МАСКИ НА НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РОСТА GaAs НАНОПРОВОЛОК

Исследования характеристик полупроводниковых нанопроволок (НП) за последние десятилетия открыли перспективу их применений в опто- и наноэлектронных приборах [1]. Наиболее популярный метод получения вертикальных НП соединений III-V групп основан на механизме пар-жидкость-кристалл (ПЖК). Наиболее распространённым является самокаталитический рост, когда металл III группы полупроводникового соединения используется в качестве катализатора роста [2]. При самокаталитическом росте для предотвращения роста паразитных GaAs структур поверхность кристаллической подложки покрывают слоем плёнки-маски [3].

Целью данной работы являлось исследование влияния скорости травления плёнки-маски жидким галлием и толщины плёнки на начальные этапы формирования НП с помощью Монте-Карло моделирования.

Изучение влияния свойств плёнки-маски на зарождение GaAs нанопроволок проводилось посредством моделирования с использованием пакета программ SilSim3D, основанного на решеточной Монте-Карло модели [4]. Настоящий вариант модели - наряду с такими процессами, как адсорбция и десорбция атомов галлия и молекул мышьяка, обратимая диссоциация молекул мышьяка, плавление Ga, растворение GaAs в жидком галлии, кристаллизация галлия в форме GaAs, диффузия атомов и молекул по поверхности - учитывается травление материала плёнки-маски жидким галлием.

Для роста НП необходимо соблюдать правильное соотношение между толщиной плёнки, скоростью травления и потоками галлия и мышьяка. Выявлено, что с увеличением толщины пленки при высокой скорости травления и низкой скорости осаждения Ga рост НП становится невозможен из-за зарастания вытравленного отверстия. Повышение потока галлия ускоряет увеличение капли галлия в размерах, что может предотвратить или замедлить зарастание отверстия в пленке. Повышенная скорость травления тонкой пленки-маски может приводить к латеральному движению капли Ga по поверхности кристаллической подложки. Увеличение потока мышьяка помогает избавиться от этого латерального движения.

1. Wang Y, Zhou X, Yang Z, Wang F, Han N, Chen Y and Ho J C 2018 *Crystals* 8(9) 1–21.
2. Fontcuberta i Morral A, Colombo C, Abstreiter G, Arbiol J and Morante J R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 063112.
3. Matteini F, Tütüncüoğlu G, Potts H, Jabeen F and Fontcuberta I Morral A 2015 *Crystal Growth and Design* **15**(7) 3105–09.
4. Карпов А Н, Зверев А В, Настовьяк А Г, Усенков С В, Шварц Н Л 2014 *Вычислительные методы и программирование* **15**(3) 388–99.

М.М. Ивкин (студ., 3 курс, СПбПУ, ВИФШ),  
В.А. Шутаев (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Е.А. Гребенщикова (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Ю.П. Яковлев (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
С.А. Рыков (д.ф.-м.н., проф., СПбПУ, ВИФШ)

## СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ ПЛЕНКИ ПАЛЛАДИЯ – ЭЛЕМЕНТА СЕНСОРА ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ Pd/InP

Датчики водорода на основе структур Pd/InP являются одними из самых перспективных для практических применений. В основе их работы лежит уникальная способность палладия поглощать водород в больших количествах. На это его свойство оказывает влияние кристаллическая структура слоев Pd, ее изучению различными методами посвящен ряд работ, в частности, с помощью оптических измерений [1]. Применение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) может дать новую информацию о локальной структуре пленок Pd и их локальных электронных свойствах.

Объектом исследования служила пленка Pd толщиной ~ 100 нм, напыленная на стекло термическим испарением в вакууме при температуре подложки 100<sup>0</sup>С. Использовался СТМ с электромагнитной системой грубого подвода образца к игле, изготовленной с помощью электрохимического травления проволоки вольфрама диаметром 300 мкм. Изучались особенности топографии поверхности пленки, измерялись локальные туннельные спектры (ЛТС). Все измерения выполнены в воздушной атмосфере при комнатной температуре. СТМ исследования топографии поверхности пленки Pd свидетельствуют о плоском ее рельефе: на поверхности размером 1x1 мкм высота рельефа не превышает 15 нм. Структура поверхности поликристаллическая с размерами кристаллитов 100-300 нм. Локальные туннельные вольтамперные характеристики (ВАХ) измерялись в последовательности изменения напряжения смещения между образцом и иглой СТМ: -0.5 В → +0.5 В → -0.5 В. Знак соответствует знаку потенциала образца. Обнаружены два типа туннельных спектров. Один из них демонстрирует симметричные нелинейные ВАХ, соответствующие локальным спектрам кристаллитов Pd. Нелинейность ВАХ свидетельствует о малой высоте туннельного барьера между образцом и иглой. Второй тип содержит ВАХ с гистерезисом. Туннельный ток в конце измерения ВАХ больше в несколько раз, чем в начале (при -0.5 В). Мы считаем, что туннелирующие электроны создают в межкристаллитных областях пленки метастабильные электронные зарядовые состояния в масштабе времени измерения ВАХ (4 мсек), изменяющие работу выхода Pd.

1. В.А. Шутаев и др. *Оптика и спектроскопия*, **129**, вып.9, 1183 (2021).

И.А. Краснова (студ., 2 курс маг., Новосибирский ГУ, каф. ФПП),  
Д.В. Горшков (м.н.с., ИФП СО РАН),  
Г.Ю. Сидоров (к.ф.-м.н., зав. лаб. №28, ИФП СО РАН)

## СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДИЭЛЕКТРИКОВ $Al_2O_3$ , $HfO_2$ И $CdHgTe$

Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ) широко применяется при исследовании топологических изоляторов, фотоприемных матриц, двумерного электронного газа, лазеров. Для всех направлений необходима пассивация поверхности КРТ. С одной стороны, из литературы [1] известно, что хорошим пассивирующим покрытием для КРТ является  $Al_2O_3$ , выращенный методом плазменно-индуцированным атомно-слоевым осаждением (ПАСО) при температуре роста  $120^\circ C$ . С другой стороны, в литературе показано, что  $HfO_2$  является хорошим пассивирующим покрытием для соединений  $A^3B^5$ . Кроме того  $HfO_2$  имеет широкий диапазон температур роста  $150-290^\circ C$ , что может оказать положительное влияние на качество границы раздела  $HfO_2$ -КРТ. Таким образом, целью данной работы является сравнение свойств диэлектриков  $Al_2O_3$  и  $HfO_2$  для пассивации КРТ.

Измерения проводились на образцах КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с составом  $x=0.22$ , отожженных в р-тип. Оксид алюминия и оксид гафния наносились методом ПАСО при температуре роста  $120^\circ C$ . Затем на диэлектрик наносился металлический контакт методом термического испарения. В результате этого получались МДП структуры. На этих структурах измерялся импеданс в зависимости от напряжения и частоты при температуре жидкого азота  $77 K$ . Из полученных данных были найдены значения емкости диэлектрика, положения напряжения плоских зон, ширина гистерезиса и карты нормированной параллельной проводимости, из которых оценивались плотности поверхностных состояний.

Установлено, что у образцов с пассивирующим покрытием  $Al_2O_3$  емкость диэлектрика меньше, чем у  $HfO_2$ , при этом оба диэлектрика однородны по поверхности. Установлено, что наибольшее по модулю значение напряжения плоских зон достигается для образца с диэлектрическим покрытием  $HfO_2$ , что свидетельствует о большем количестве фиксированного встроенного заряда, чем у  $Al_2O_3$ . Установлено, что наибольшая ширина гистерезиса наблюдается у образца с  $HfO_2$ . Это свидетельствует о наличии в диэлектрике большего числа медленных состояний для образцов с  $HfO_2$ , чем с  $Al_2O_3$ . Из полученных карт нормированной параллельной проводимости было оценено, что наибольшее значение плотности поверхностных состояний достигается в образце с диэлектрическим покрытием  $Al_2O_3$ .

Таким образом установлено, что для КРТ пассивирующие свойства  $HfO_2$  не уступают свойствам  $Al_2O_3$ .

1. D.V. Gorshkov and etc., *Technical Physics Letters*, Vol. 46, No. 8, pp. 741–744 (2020).

А.И. Баранов (к.ф.-м.н., СПБАУ, лаб. ВИЭ),  
А.А. Максимова (асп., 2 год, СПБАУ, ЛВИЭ),  
А.В. Уваров (м.н.с., СПБАУ, лаб. ВИЭ),  
Е.А. Вячеславова (асп., 2 год, СПБАУ, ЛВИЭ),  
А.С. Гудовских (д.т.н., СПБАУ, лаб. ВИЭ)

## ЛЕГИРОВАНИЕ СИЛАНОМ СЛОЕВ GaP, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

На сегодняшний день ведутся активные исследования по поиску  $A^3B^5$  материалов для создания многопереходных солнечных элементов (СЭ) на подложках кремния. Одним из перспективных направлений является использование полупроводников на основе GaP из-за близости постоянной решетки с Si. Согласно теоретическим расчетам, можно создать двухпереходный солнечный элемент с оптимальными параметрами ширины запрещенной зоны для каждого субэлемента: нижний на основе гетероперехода p-Si/n-GaP, где поглощение происходит в подложке кремния с  $E_g=1.1$  эВ, и верхний – на основе p-i-n перехода с поглощающим слоем i-GaP(N) с  $E_g=1.7 - 2.2$  эВ. Ранее было показано, что плазменно-стимулированное атомно-слоевого осаждение при температурах ниже 400 °C с большой мощностью водородной плазмы или дополнительным шагом обработки в атмосфере аргона позволяет формировать слои GaP микрокристаллической структуры с донорным типом проводимости [1], а также встроить азот в GaP(N) путем роста цифрового раствора GaP/GaN [2]. Тем не менее, существует проблема медленного роста GaP этим методом, поэтому в данной работе будут исследованы толстые слои GaP более 100 нм, полученные классическим методом плазмохимического осаждения в непрерывном режиме для разных условий роста, и возможность их легирования кремнием.

В работе исследованы электрофизические характеристики слоев GaP толщиной 150-250 нм. Продемонстрировано, что слои с аргоновой плазмой обладают на три порядка большей проводимостью, чем слои с водородной плазмой. Это объясняется меньшей энергией активации проводимости слоев  $E_a=0.50$  эВ с аргоновой плазмой, чем 0.90 эВ с водородной, которые были измерены методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней и спектроскопии полной проводимости. Показано, что добавление и увеличение потока силана приводит к уменьшению  $E_a$  и значительному увеличению проводимости слоев, выращенных при водородной плазме, в то время как для аргоновой плазмы проводимость слоев остается практически неизменной. Кроме того показано, что используемые режимы роста приводят к формированию дефектных уровней в приповерхностной области подложки кремния.

Работа поддержана грантом в виде стипендии Президента РФ № СП-1207.2019.1.

1. Uvarov A V *et al* 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 345105.
2. Uvarov A V *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1851** 012008.

Е.В. Бойко (асп., 4 год, Новосибирский ГУ),  
И.А. Костогруд (к.ф.-м.н., м.н.с., ИТ СО РАН),  
Д.В. Смовж (к.ф.-м.н., зав. лаб., ИТ СО РАН)

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕР-ГРАФЕНОВОГО КОМПОЗИТА ПРИ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ

Физическая картина термоакустического эффекта может быть описана следующим образом: при прохождении переменного электрического тока через тонкую проводящую плёнку происходит выделение тепла на её поверхности, что приводит к локальному нагреву окружающей атмосферы. Периодические изменения температуры поверхности приводят к локальному изменению давления воздуха и возникновению звуковых колебаний.

Отличительной особенностью устройств, генерирующих звук благодаря термоакустическому эффекту, является отсутствие механически подвижных частей. Подобные преобразователи позволяют получать звуковое излучение с частотой вплоть до 500 кГц [1] и при этом лишены недостатка в виде каких-либо резонансных явлений. Одним из материалов, используемых при создании термоакустических преобразователей, является графен, получаемый методом химического осаждения из газовой фазы. Данный материал, обладая стабильной двумерной структурой, толщиной 0.3 нм, имеет высокую теплопроводность 5300 Вт/м\*К. Такое сочетание свойств в одном материале делает графен превосходным кандидатом при создании термоакустических устройств. Однако, существующие теоретические модели не учитывают неоднородное распределение температуры на поверхности поликристаллического графена, что было показано в нашей работе [2]. Фактически поверхность можно описать как сеть из точечных источников звука, в то время как теоретические модели в научной литературе оперируют сплошными покрытиями. Чтобы восполнить этот пробел в знаниях, в данной работе исследуется распределение температуры на поверхности композита полимер-графен, а также проводится оценка температуры, которой достигает проводящее графеновое покрытие за один период нагрева.

Синтез графена был произведен при помощи метода химического осаждения из газовой фазы. Экспериментально исследован процесс распределения тепла в многослойном композите, состоящем из графена, полимера ПЭТ/ЭВА и медной подложки, при термоакустическом эффекте. Была сформирована теоретическая модель, на основании которой получено распределение температуры вдоль поверхности полимер-графеновых образцов. Рассчитаны значения температур, до которых нагревается графеновая плёнка за один период нагрева для различных величин вкладываемой электрической мощности.

1. Q. Zhou et al., Graphene electrostatic microphone and ultrasonic radio // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 2015. № 112. P. 8942.
2. D.V. Smovzh et al., Joule heater based on single-layer graphene // Nanotechnology, Vol. 31, № 33. P. 1.

М.С. Гаврилов (лаборант, СПбАУ, лаб. ВИЭ),  
Л.Н. Дворецкая (м.н.с., СПбАУ, лаб. ВИЭ),  
В.В. Фёдоров (к.ф.-м.н., СПбАУ, лаб. ВИЭ),  
И.С. Мухин (д.ф.-м.н., СПбАУ, лаб. ВИЭ)

## ТЕКСТУРИРОВАНИЕ СЛОЕВ ГРАФЕНА ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ ЭПИТАКСИИ $A^3B^5$ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ НА КРЕМНИИ

В последнее десятилетие широкое развитие получили методы синтеза эпитаксиальных гетероструктур на основе полупроводниковых нитевидных нанокристаллов (ННК), что связано как с многообещающими перспективами их применения для создания устройств нанофотоники и оптоэлектроники, а также для наблюдения новых физических явлений, вызванных размерными эффектами. Современные методы позволяют синтезировать массивы ННК на подложках с достаточно большим решеточным рассогласованием, достигающим до нескольких процентов, например, системы арсенида галлия (GaAs), нитрида галлия (GaN) на кремнии. При этом, возникающие упругие напряжения приводят к существенному ограничению латеральных размеров гетероинтерфейса ННК/подложка, а следовательно, ограничивают возможности управления морфологией ННК. Использование структурированных листов двумерного материала, например, слоя графена, значительно расширяет возможности методов селективной эпитаксии.

Целью данной работы была отработка метода переноса листов графена на покрытую оксидным слоем кремниевую подложку с дальнейшим текстурированием слоя графена методом микросферной литографии. На подложках Si/SiO<sub>2</sub>/графен мы показали возможность эпитаксиального синтеза нитевидных нанокристаллов InAs, формирующихся на слое графена. Морфология массивов ННК исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии.

Монослой графена, синтезированный на медной фольге был перенесен на подложку Si/SiO<sub>2</sub> из раствора с предварительным осаждением полиметилметакрилата (ПММА). Структурирование графена реализовалось использованием метода фотолитографии через массив микросферических линз и заключалось в нанесении на поверхность монослоя полистрироловых (PS) и кварцевых (SiO<sub>2</sub>) микросфер, которые фокусируют излучение в области резиста.

В работе были исследованы процессы эпитаксии ННК InAs на поверхности подложек Si/Ga методом молекулярно-пучковой эпитаксии и исследованы синтезированные массивы ННК с помощью оптической и электронной микроскопии. Так же методом микросферной литографии были получены наностолбики из графена на кремниевой подложке.

Работа была проведена при поддержке российского научного фонда РФ (21-79-10346) и РФФИ (20-32-70200).

ПОЛУЧЕНИЕ МАГНЕТРОННЫХ ПЛЕНОК АРСЕНИДА КАДМИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ  
ПОДЛОЖКАХ

В последнее время материалы с топологически защищенными квантовыми состояниями являются одними из наиболее интенсивно изучаемых объектов физики твердого тела. Арсенид кадмия ( $\text{Cd}_3\text{As}_2$ ) - узкозонный полупроводник группы II-V с тетрагональной кристаллической структурой, инверсным расположением зон - недавно отнесен к группе топологических материалов – дираковским полуметаллам. Отличительной особенностью дираковских полуметаллов является то, что у них вблизи уровня Ферми поведение носители заряда становится подобным поведению релятивистских частиц.  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  обладает самым большим из наблюдаемых в тетрагональных полупроводниковых материалах значением подвижности основных носителей заряда (до  $900 \text{ м}^2 / (\text{В.с})$  при 5 К, а при более низких температурах может переходить в сверхпроводящее состояние. Кристаллы  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  становятся сверхпроводниками при внешних воздействиях [1], а пленки, полученные различными способами [2, 3], без них.

В настоящей работе исследовались тонкие магнетронные плёнки  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , напылённые на подложки из кремния, сапфира и титаната стронция, с целью определения влияния условий осаждения и отжига на их структуру.

Напыление пленок толщиной от 25 до 60 нм происходило в вакуумной системе ВН-2000, оснащенной приставкой ВЧ-магнетронного неактивного напыления. Для изучения структуры и состава пленок использовали методы рентгенофазового анализа, сканирующей электронной и атомно силовой микроскопии, энергодисперсионного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света, голографической микроскопии.

Было установлено, что рост пленок на всех подложках происходил по механизму Странского–Карстанова, а сами пленки имеют столбчатую структуру с диаметром, сопоставимым с толщиной пленки. Пленки, выращенные на подложках из кремния, обладали наименьшей кристаллическостью. Ориентационное влияние подложек (нагреваемых до  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ) во время осаждения обнаружено не было как для кремния и сапфира, так и для титаната стронция, который обладает хорошей совместимостью параметров кристаллической решетки с арсенидом кадмия. Отжиг пленок при температуре  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к их текстурированию с осью текстуры (112). При анализе атомно-силовых изображений поверхности пленок была определена фрактальная размерность ( $D$ ) неоднородностей структуры. Для всех пленок ее значение превышало 2, что указывает на 3-х мерность морфологии. После отжига  $D$  уменьшается. Так же после отжига спектры комбинационного рассеяния света приобретают вид, характерный для объемных кристаллов арсенида кадмия с присутствием двух пиков около  $192 \text{ см}^{-1}$  и  $248 \text{ см}^{-1}$ .

1. L. Aggarwal et.al. *Nat. Mater.* **15** 32 (2016).
2. A.V. Suslov et.al. *Phys. Rev. B.* **99** 094512 (2019).
3. L.N Oveshnikov et. al., *Sci. Rep.* **10** 4601 (2020).

Д.С. Золотухин (асп., 4 год, Воронежский ГУ, каф. ФТТНС),  
А.С. Леньшин (д.ф.-м.н., в.н.с., ВГУ, каф. ФТТНС),  
А.Н. Бельтюков (к.ф.-м.н., с.н.с., УдмФИЦ УРО РАН),  
П.В. Середин (д.ф.-м.н., проф., ВГУ, каф. ФТТНС),  
А.М. Мизеров (к.ф.-м.н., в.н.с., СПБАУ РАН)

ОСОБЕННОСТИ РОСТА И СОСТАВА ГЕТЕРОСТРУКТУР  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/Si$ ,  
ВЫРАЩЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУФЕРНОГО СЛОЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ  
МЕТОДОМ ПА МПЭ

Использование подложек кристаллического кремния для эпитаксии гетероструктур  $AlGaN$  является достаточно перспективным вариантом из-за их технологичности и относительно невысокой стоимости. Однако при этом достаточно серьезной проблемой, сдерживающей развитие технологии роста гетероструктур нитридов III группы на кремнии, является сильное рассогласование параметров кристаллических решеток этих материалов и различие коэффициентов термического расширения  $AlGaN$  и  $Si$ . Это может приводить к возникновению большого количества различных дефектов и дислокаций, к неконтролируемым флуктуациям состава твердых растворов, отслаиванию гетероструктур. Для решения этих проблем в последние годы предпринимаются попытки введения в структуру различных переходных буферных слоев  $A^3N/Si$ .

В данной работе была оценена эффективность внедрения в технологию роста  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/Si$  в качестве буфера дополнительного слоя нанопористого кремния и его влияние на морфологические параметры и состав поверхности гетероструктур.

Наноструктуры типа  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/Si/por-Si/Si$  с использованием буферного слоя пористого кремния были сформированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота. С привлечением методов сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, а также рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было показано, что формирование буферного слоя пористого кремния способствует более однородному распределению по размерам наноколонн гетероструктуры по сравнению с аналогичными структурами, выращенными на монокристаллическом кремнии при тех же условиях, а также небольшому изменению их состава (~ 5 % в сторону  $Al$ ), связанного, очевидно, с различиями в процессе роста и коалесценции наноколонн в этих структурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 19-72-10007.



С.А. Кадинская (асп., 3 год, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
В.М. Кондратьев (асп., 2 год, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
И.В. Штром (к.ф.-м.н., с.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
А.Д. Большаков (к.ф.-м.н., в.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова)

## РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА

В современном мире информационных, цифровых и мультимедийных технологий большое внимание привлекают источники света на основе широкозонных полупроводников, позволяющих получать излучение фиолетового и ультрафиолетового диапазонов, что широко используется в современной электронике, медицине, а также в повседневной жизни [1].

Оксид цинка (ZnO) – один из перспективных материалов для создания УФ-излучателей из-за ширины запрещенной зоны (3,37 эВ при комнатной температуре) и высокой энергии связи экситона (60 мэВ). Кроме того, ZnO является недорогим, относительно распространенным, химически стабильным, легко синтезируемым и нетоксичным материалом. Несмотря на то, что на данный момент создано большое разнообразие светоизлучающих устройств (светодиодов) на основе ZnO, их характеристики, светоизлучающая способность и технологии производства все еще ниже ожидаемых.

Гидротермальный синтез – распространенный метод получения нанокристаллов ZnO, характеризующийся низкой стоимостью и высокой масштабируемостью, а также широкими возможностями контроля морфологии получаемых наноструктур за счет применения поверхностно-активных веществ (ПАВ). В ходе данной работы было синтезировано 3 образца на подложках Si(111) с использованием  $Zn(NO_3)_2$  и НМТА: без использования ПАВ, с использованием цитрата натрия и с использованием полиэтиленимина. В результате были получены наноструктуры следующих морфологий: стержни с отношением длины к толщине примерно 10:1, гексагональные микрокристаллы ZnO, нитевидные нанокристаллы ZnO.

Полученные образцы исследовались методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ). Полученные спектры продемонстрировали излучение, содержащее линии связанных на нейтральных и ионизованных донорах экситонов ( $D^0X$ ) в области коротких волн, при этом в длинноволновой области спектра наблюдается полоса излучения, обусловленная донорно-акцепторными переходами. Спектры ФЛ демонстрируют отсутствие отклика в видимой области, что свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве синтезированных структур ZnO. Интенсивность ФЛ коррелирует с объемом активной среды. Проведенные исследования показывают перспективность предложенных ростовых подходов для достижения ННК высокого кристаллического совершенства, заданной геометрии с требуемыми оптическими свойствами для создания локальных источников УФ излучения.

1. Y. Choi, J. Kang, D. Hwang and S. Park, "Recent Advances in ZnO-Based Light-Emitting Diodes," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 57, no. 1, pp. 26-41, Jan. 2010.

Д.А. Колосовский (асп., 1 год, ИФП СО РАН),  
Д.В. Дмитриев (ИФП СО РАН),  
С.А. Пономарев (асп., 1 год, НГУ),  
А.И. Торопов (к.ф.-м.н., ИФП СО РАН),  
К.С. Журавлев (д.ф.-м.н., ИФП СО РАН)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕСОРБЦИИ ФОСФОРА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОТЖИГЕ ПОДЛОЖКИ InP(001) В ПОТОКЕ МЫШЬЯКА

Подложки InP(001) используют для создания гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), на основе которых изготавливают транзисторы с высокой подвижностью электронов, лазеры, электрооптические модуляторы и фотодиоды. Рост гетероструктуры начинается с удаления аморфного окисного слоя с поверхности подложки. Обычно окисный слой на подложке InP удаляют высокотемпературным отжигом в потоке As. Однако в процессе отжига происходит изменение элементного состава поверхности подложки с образованием твердого раствора InPAs и островков InAs [1]. Решеточное рассогласование между InP и InAs приводит к возникновению напряжений и центрам зарождения дефектов в ГЭС. Причиной изменения элементного состава является десорбция P из InP и встраивание As вместо P. Определение скорости десорбции фосфора важно для построения модели процессов зародышеобразования и роста ГЭС. Поэтому целью работы является определение скорости десорбции P из данных о морфологии и элементном составе поверхности InP(001), отожженной в потоке As.

В работе использовались *epi-ready* подложки InP(001) фирмы АХТ. Отжиг проводился в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии Riber Compact 21T. Температура отжига ( $T$ ) варьировалась от 500 до 540°C, а поток мышьяка изменялся от  $1.1 \times 10^{-5}$  до  $2.5 \times 10^{-5}$  Торр. Экспериментальные образцы были поделены на две серии. Отжиг образцов первой серии завершался при получении сверхструктуры (4×2), образцы второй серии дополнительно выдерживались 2 минуты в потоке мышьяка при температуре формирования сверхструктуры (4×2), после чего процесс отжига завершался. Морфологию поверхности образцов исследовали методом атомно-силовой микроскопии на микроскопе Bruker Multimode 8.

Скорость десорбции фосфора ( $v_p$ ) была определена из зависимости количества атомов мышьяка на поверхности подложки от  $T$  и времени выдержки в потоке мышьяка.  $v_p$  повышается от  $6.03 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$  при  $T = 500^\circ\text{C}$  до  $4.38 \times 10^{11} \text{ c}^{-1}$  при  $T = 540^\circ\text{C}$ . Из аппроксимации зависимости  $v_p$  от  $T_{sub}$  была определена энергия активации десорбции фосфора, которая составила 2.69 эВ, что близко к литературному значению 2.96 эВ [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта №20-42-540009.

1. Dmitriev D.V., Kolosovsky D.A., Gavrilova T.A., Gutakovskii A.K., Toropov A.I., Zhuravlev K.S., 2021 Surf. Sci. 710 121861.

2. Kobayashi N., Kobayashi Y., 1991 Jpn. J. Appl. Phys. 30 L1699.

И.И. Кондрашов (м.н.с., ОСПЯ ЦЕНИ, ИОФ РАН),  
А.Ю. Переяславцев (к.ф.-м.н., ФГУП ВНИИА),  
Е.Д. Образцова (зав. лаб., к.ф.-м.н., ОСПЯ ЦЕНИ, ИОФ РАН),  
М.Г. Рыбин (с.н.с., к.ф.-м.н., ОСПЯ ЦЕНИ, ИОФ РАН)

## CVD СИНТЕЗ НИТРИДА БОРА ИЗ ТВЕРДОГО ИСТОЧНИКА

Низкоразмерные наноматериалы, такие как графен, нитрид бора (BN), углеродные нанотрубки - остаются одними из наиболее интересных для современных исследований материалами. Тогда как, газофазное химическое осаждение (CVD) является надежным и экономичным методом синтеза этих материалов. Для синтеза тонких пленок нитрида бора, в частности, гексагонального (h-BN), использовалось множество способов, включая механическое и химическое расслоение, дуговой синтез, распыление и т. д. Широко применялся CVD синтез BN с использованием аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и трихлорида бора ( $\text{BCl}_3$ ), однако оба газа являются ядовитыми и опасными для человека. Наиболее безопасной альтернативой этим газам является использование твердого источника в качестве прекурсора - боразана ( $\text{BNH}_6$ ) – взрывобезопасный и неядовитый порошок. При этом получение тонких пленок BN большой площади все еще остается актуальной задачей.

В настоящей работе для синтеза пленок BN использовалась установка по CVD синтезу с резистивным нагревом каталитической подложки. Эта установка показала свою эффективность при CVD синтезе графена из газовой фазы, а также из твердых прекурсоров. Как и в случае синтеза графена, в качестве каталитической подложки использовалась медь толщиной 25 микрон. Процесс синтеза BN пленок представлял собой постепенное термическое разложение боразана и формирование пленок на медной фольге при температуре порядка 1000 °C. При увеличении количества прекурсора, а также времени синтеза наблюдалось увеличение толщины получаемых пленок, что было связано с постепенным разложением боразана. Постепенное разложение также влияет на структуру пленок при уменьшении температуры синтеза, когда наблюдается увеличение градиента толщины пленки от краев к центру. Удалось добиться оптимальных параметров эксперимента для получения наиболее равномерных пленок.

Анализ BN пленок проводился с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). В КРС спектрах подтверждено наличие пика на  $\sim 1367 \text{ см}^{-1}$ , определяющего BN, но с пониженной интенсивностью, что характерно для тонких пленок. Анализ элементного состава пленок показал наличие бора и азота в равных пропорциях с незначительным количеством примесей.

Ю.М. Кузнецов (асп., 4 курс, каф. ФПЭН, ННГУ),  
 Д.А. Здоровейщев (студ., 3 курс, каф. ФПЭН, ННГУ),  
 М.В. Дорохин (д.ф.-м.н., зав. лаб., НИФТИ ННГУ),  
 А.В. Здоровейщев (к.ф.-м.н., с.н.с., лаб. НИФТИ ННГУ),  
 Р.Н. Крюков (м.н.с., лаб. НИФТИ ННГУ),  
 В.П. Лесников (н.с., лаб. НИФТИ ННГУ)

## ПОЛУЧЕНИЕ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА ТЕРМОДИФФУЗИЕЙ В МЕТОДЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Для практической реализации приборов спинтроники необходимо разработать тонкоплёночные ферромагнитные полупроводниковые материалы с температурой Кюри близкой к комнатной. Наиболее перспективными являются разбавленные магнитные полупроводники группы  $A^3B^5$ . В частности, было показано, что в структурах, содержащих марганец, таких как  $GaMnAs$  [1] и  $GaMnSb$  [2] наблюдаются ферромагнитные свойства до температуры 240К. На подобных слоях были созданы спиновые светоизлучающих диоды [1], работающие при низких температурах. В работах [3,4] показано, что замена марганца на железо позволяет получить ферромагнитные свойства в слоях  $InFeSb$  и  $GaFeAs$  при 300К.

В данной работе для формирования разбавленного магнитного полупроводника предлагается следующий способ: на подложку GaAs методом импульсного лазерного осаждения в вакууме [5] наносятся плёнки  $Fe$  или сплавы  $Fe-Mn-C$ , затем проводят дополнительный постростовой отжиг структуры, приводящий к диффузии атомов  $Fe$  и  $Mn$  в подложку с образованием магнитных фаз. Таким способом была получена серия структур, в которой варьировались температуры нанесения и отжига, толщина плёнки.

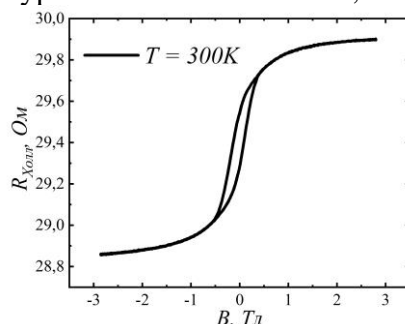


Рис.1. Магнитополевая зависимость сопротивления Холла

На полученных образцах исследовались магнитные свойства путём регистрации магнитополевой зависимости сопротивления Холла, пропорционального намагниченности [4]. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, дополненным возможностью ионного травления, был получен профиль распределения элементов. В работе продемонстрирована диффузия  $Fe$  и  $Mn$  в объём полупроводника, которая сопровождается формированием химических связей  $Fe-C$ ,  $Mn-As$ ,  $Ga-Fe$ ,  $Fe-As$ , соответствующих различным магнитным соединениям. Это обуславливает наличие ферромагнитных свойств при комнатной температуре, что подтверждается гистерезисной зависимостью сопротивления Холла от магнитного поля (рис.1).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (20-38-70063, 20-32-90032).

1. B.N. Zvonkov et al. Phys. Solid State, 62, 3, P.423, (2020).
2. A.D. Talantsev, O.V. Koplak, R.B. Morgunov, Phys. Solid State, 57, P.322, (2015).
3. S. Goel et. al., Phys. B, 3, 084417 (2019).
4. S.S. Khludkov, I.A. Prudaev, O.P. Tolbanov. Russ. Phys. J., 61, 3, P.491, (2018).
5. T.W. Trelenberg et al. Surf. Sci., 221, P.364, (2004).

В.С. Хорошилов (асп., 2 год, Новосибирский ГУ, ИФП СО РАН),  
Д.М. Казанцев (к.ф.-м.н., н.с., ИФП СО РАН),  
В.Л. Альперович (д.ф.-м.н., г.н.с., ИФП СО РАН)

## АСИММЕТРИЯ АНТИПЕРЕСЕЧЕНИЯ АТОМНЫХ СТУПЕНЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МЕТАЛЛОВ

Атомные ступени определяют технологически важные процессы роста и сублимации кристаллов, а также механизмы формирования наноструктур на поверхностях полупроводников и металлов. Близкие к идеальным вицинальные кристаллические поверхности состоят из регулярных атомно-гладких террас, разделенных ступенями моноатомной высоты. Другой тип атомных ступеней вызван дислокациями, унаследованными от подложки или введенными вследствие пластической релаксации механических напряжений. Взаимодействие между вицинальными и дислокационными ступенями радикально меняет топологию ступенчато-террасированной поверхности: на пересечении исходных моноатомных вицинальной и дислокационной ступеней формируется трехуровневая конфигурация "антипересечения" с двумя новыми комбинированными непересекающимися атомными ступенями, ограничивающими противоположные области с самой высокой и самой низкой террасами, а также "перешейком" нанометрового размера, который соединяет противоположные области с одинаковым промежуточным уровнем [1]. Изучение кинетики ширины перешейка на поверхности Au(111) позволило определить вклады различных микроскопических механизмов в формирование конфигурации антипересечения [1]. Однако два экспериментальных наблюдения оставались необъясненными. Во-первых, как на GaAs(001), так и на Au(111), вицинальные сегменты комбинированных ступеней являются более шероховатыми по сравнению с прямолинейными дислокационными сегментами; это различие приводит к асимметрии антипересечения относительно оси поперёк перешейка. Во-вторых, конфигурация антипересечения несимметрична относительно оси вдоль перешейка из-за различия радиусов кривизны комбинированных ступеней, ограничивающих верхнюю и нижнюю террасы. Данная работа посвящена выяснению возможных причин асимметрии конфигурации антипересечения путем сопоставления эксперимента с результатами моделирования Монте-Карло. Показано, что кинетика нарастания шероховатости формы дислокационных ступеней, ориентированных вдоль сингулярных кристаллографических направлений, существенно медленнее, чем вицинальных ступеней. "Продольную" асимметрию антипересечения на поверхности Au(111) удастся объяснить влиянием барьера Швёбеля и различием коэффициентов диффузии адатомов и вакансий. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-72-30023).

1. C. Coupeau, D.M. Kazantsev, M. Drouet, V.L. Alperovich, *Acta Mater.* 175 (2019) 206.

УДК 535.015

А.А. Бутюгина (студ., 4 курс бак., СПбГУ, каф. фотоники),  
 Р.С. Назаров, И.А. Соловьёв (СПбГУ, каф. фотоники),  
 H.D. Reuter, A.D. Wieck (Рурский университет, ФТТ),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., с.п., СПбГУ, каф. фотоники)

## ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАКА ЗАРЯДА КВАНТОВОЙ ЯМЫ GaAs/AlGaAs

Для реализации хранения и управления оптической информацией возможно использование спиновых состояний в полупроводниковых материалах. Преимущество таких методов заключается в том, что он позволяет осуществлять быструю запись с помощью коротких лазерных импульсов на субпикосекундных временах. С помощью фотонного эха на заряженных экситонных комплексах (трионах) можно создать долгоживущую оптическую память. В связи с этим необходимо регулировать знак зарядов в квантовой яме, например, с использованием надбарьерной оптической накачки [1].

В данной работе было проведено исследование фотолюминесценции (PL) квантовой ямы GaAs / AlGaAs при надбарьерной оптической накачке ( $E=2.33$  эВ). Без накачки в квантовой яме присутствовали резидентные дырки, поэтому в спектрах фотолюминесценции наблюдались особенности, связанные с положительными трионами. С ростом интенсивности накачки уменьшается сигнал от положительных трионов ( $T^+$ ) и появляется сигнал от экситонов ( $X$ ), после чего наблюдается сигнал от отрицательных трионов ( $T^-$ ) (Рис. 1.(а)). Таким образом, с помощью надбарьерной подсветки можно контролировать знак и концентрацию трионов в квантовой яме (Рис. 1.(б)).

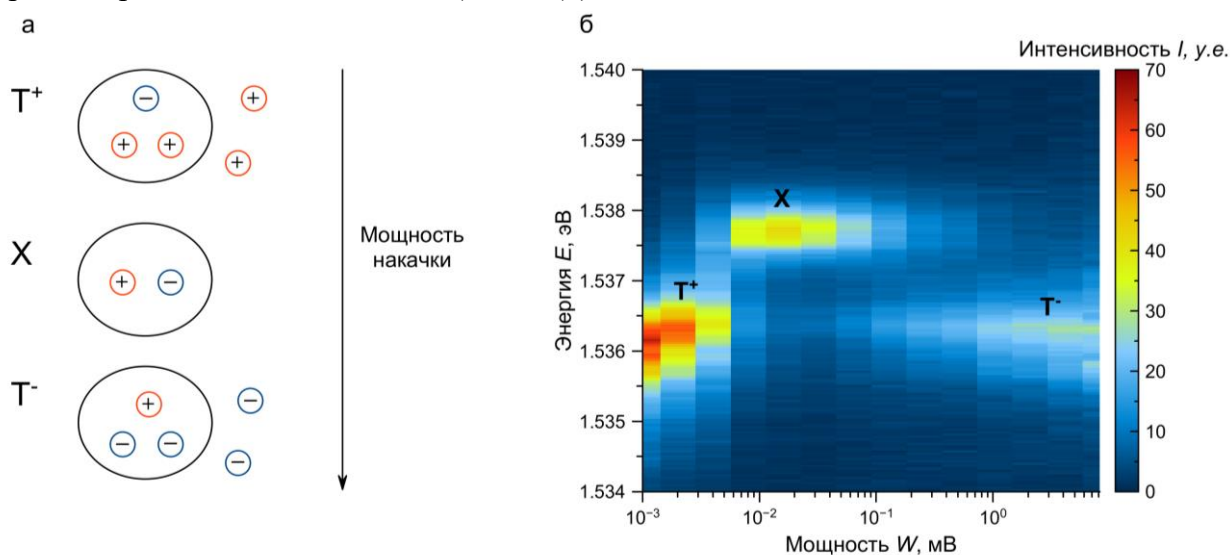


Рис. 1. Процесс накачки (а), зависимость спектров PL от мощности накачки (б)

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника» при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-52-12046 nnio\_a).

1. I.A. Solovet et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **929** 012090 (2017).

Л.А. Алтынбаев (студ., 6 курс, СПбПУ, ФизМех),  
Л.В. Котова (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
В.П. Кочерешко (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

### КОНВЕРСИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ОСНОВЕ CdTe

Исследовались оптические свойства гетероструктур с квантовыми ямами на основе CdTe/Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te, выращенных на подложках Cd<sub>(1-x)</sub>Zn<sub>x</sub>Te при  $x=20\%$  и  $x=4\%$  в направлении (001). Толщина квантовых ям во всех случаях составляла 8 нм. Из-за рассогласования постоянных решетки материалов подложки, барьеров и ям, в барьерах и ямах имели место механические напряжения. В данном случае механические напряжения можно свести к гидростатическому сжатию/растяжению и одноосной деформации вдоль оси роста структуры. Причем структуры, выращенные на подложках с  $x=20\%$  и  $x=4\%$ , имели противоположные знаки одноосной деформации (в одном случае - растяжение, а в другом случае - сжатие). Одноосная деформация в направлении (001) приводит к расщеплению состояний легких и тяжелых дырок, при этом знак расщепления зависит от знака деформации. Кроме того, подложка с составом  $x=20\%$  была прозрачной в спектральной области экситонных резонансов в квантовой яме, что позволяло измерять не только спектры отражения и фотолюминесценции, но и спектры пропускания.

Изучались спектры фотолюминесценции, поляризационного отражения и пропускания этих структур при температурах 10 К и 77 К при нормальном и наклонном падении света. В спектрах наблюдались особенности, связанные с экситонными резонансами легких и тяжелых экситонов в барьерах и ямах. Были построены спектральные зависимости параметров Стокса прошедшего и/или отраженного света от этих гетероструктур. При наклонном падении на образец линейно поляризованного в  $S$  или  $P$  поляризациях света, на энергиях экситонных резонансов, в спектрах отражения наблюдалась аномально большая конверсия линейной поляризации в круговую. Величина конверсии на экситоне в барьерах достигала 20% и была на порядок больше, чем на экситонных резонансах в квантовой яме. При нормальном падении конверсии поляризаций не наблюдалась.

Конверсия поляризаций при наклонном падении на образец света в  $S$  или  $P$  поляризациях может быть вызвана только явлением двулучепреломления, или явлением естественной оптической активности. Однако в нашем случае деформации вдоль оси роста не может приводить к конверсии поляризаций. Известно, что явление естественной оптической активности в кубических кристаллах тетрагональной симметрии ( $T_d$ ) отсутствует. Понижение симметрии до ( $D_{2d}$ ) при одноосной деформации и/или размерном квантовании в яме может привести к появлению естественной оптической активности.

В статьях [1, 2] также наблюдалась конверсия линейной поляризации в круговую в квантовых ямах и в объеме. Однако ее величина в нашем случае более чем на порядок превышает наблюдавшуюся в этих статьях. Одной из причин такой аномально большой величины конверсии поляризаций может быть смешивание состояний легких и тяжелых дырок в ямах и барьерах.

Полученные экспериментальные результаты и анализ причин аномально большой конверсии поляризаций будет обсуждаться в данном докладе.

1. Kotova L.V.; Platonov A.V.; Kats V.N.; Kochereshko V.P.; Sorokin S.V.; Ivanov S.V.; Golub L.E., Phys.Rev. B, v.94, p.165309 (2016).
2. Ивченко Е.Л., Селькин А.В. ЖЭТФ т.76, №5, с.1837 (1979).

МЕТОД THz-TDS В ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО  
ГАЗА В КВАНТОВЫХ ЯМАХ InGaN/GaN

Предложен новый подход к определению параметров двумерного электронного газа (2ДЭГ) в квантовых ямах InGaN/GaN, основанный на регистрации частот плазмонных резонансов, возбуждаемых в 2ДЭГ в рамках метода терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS) [1]. Объектами исследования являются светодиодные гетероструктуры InGaN/AlGaN/GaN с квантовыми ямами InGaN/GaN. Спектры ТГц-излучения были записаны в геометрии пропускания (рис. 1).

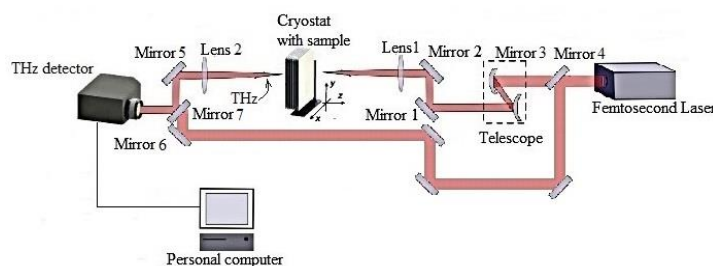


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации ТГц плазмонных резонансов в образцах гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN

Излучение титан-сапфирового лазера с длительностью импульса 135 фс и длиной волны 797 нм разделяется на два луча. Первый из них направлен на генерацию плазмонных осцилляций в системе 2ДЭГ. Второй проходит через оптическую систему задержки и используется для управления ТГц-детектором, чувствительным к электрическому полю ТГц импульсов. Временное стробирование ТГц-детектора, регистрирующего ТГц излучение, осуществлялось путем изменения расстояния между зеркалами 6 и 7. При взаимодействии лазерного пучка с 2ДЭГ, наблюдалась генерация ТГц-излучения с характерными резонансными частотами 2,37 ТГц, 3,48 ТГц. Быстрое Фурье преобразование позволило произвести моделирование мощности и фазового сдвига ТГц-излучения в диапазоне температур от 90 до 170К с шагом 30 К. При температурах > 170 К особенности плазмонного резонанса не разрешались. В ходе исследования обнаружен эффект модуляции фазы.

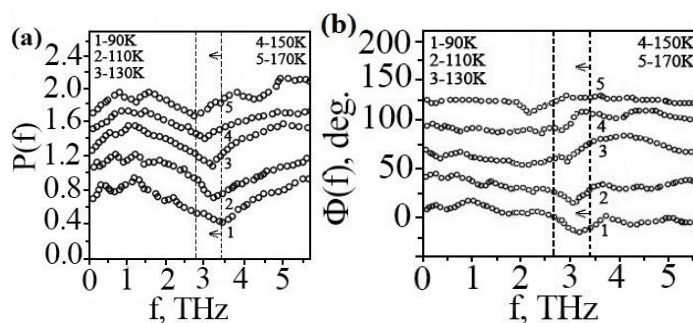


Рис. 2. Частотная зависимость мощности (а) и фазы (б) ТГц излучения для образца. Стрелки указывают на красное смещение 2Д плазмонного резонанса

1. **Zhang, Xi-Cheng, Xu, Jingzhou, Introduction to THz Wave Photonics.** 2010, 248 p.



А.А. Иванов (студ., 2 курс маг., СПбПУ, ФизМех),  
В.В. Чалдышев (д.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## РЕЗОНАНСНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК КВАЗИУПОРЯДОЧЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ БРЭГГОВСКОЙ СТРУКТУРЫ СО 100 КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN

В резонансных брэгговских структурах электромагнитное связывание индивидуальных экситонов приводит к формированию сверхизлучающей оптической моды [1]. Резонансные брэгговские структуры на основе квантовых ям InGaN позволяют наблюдать экситон-поляритонный резонанс при комнатной температуре [2], что является важнейшим фактором для использования суперизлучательной моды экситонных поляритонов в оптических и оптоэлектронных приборах. Поскольку структура реальных гетероструктур с большим числом периодов обычно далека от строго периодической, возникает необходимость в экспериментальных исследованиях квазиупорядоченных систем с целью определения границы допустимых отклонений.

Мы сообщаем об экспериментальной реализации и теоретическом анализе оптических свойств периодической системы из 100 квантовых ям InGaN, разделенных туннельно-непрозрачными барьерами GaN, так что брэгговский резонанс электромагнитных волн мог быть реализован на частоте экситонов в квантовых ямах. Образец был выращен с использованием метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений и имеет некоторую неоднородность толщины слоев. Измерения спектров оптического отражения и пропускания проводились для разных углов падения и поляризаций света при комнатной температуре. Для определения параметров экситонов в квантовых ямах мы используем компьютерное моделирование оптических спектров, основанное на использовании метода матриц переноса, которые строятся на основе формул экситонного отражения и пропускания, приведенных в работе [1]. Предыдущие наши результаты показали, что учет только резонансных особенностей структуры не позволяет описать экспериментальные результаты вблизи энергии запрещенной зоны GaN. Мы улучшили нашу модель посредством учета поглощения в непрерывном спектре состояний квантовой ямы.

Нами верифицирована модель, позволяющая описать экспериментальные данные в широком диапазоне длин волн для различных углов падения и поляризаций света. Параметр радиационного затухания определен равным  $0,2 \pm 0,02$  мэВ, а параметр нерадиационного затухания 50 мэВ. В рамках данной модели проведен анализ влияния неоднородности толщин слоев в резонансной брэгговской структуре на ее резонансный оптический отклик. Мы определяем критическое значение беспорядка для структур с квантовыми ямами InGaN.

1. Е.Л. Ивченко, А.И. Несвижский, С. Йорда, *ФТТ*, **36**, 2118 (1994).
2. V.V. Chaldyshev, A.S. Bolshakov, E.E. Zavarin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 251103 (2011).
3. А.А. Иванов, В.В. Чалдышев, Е.Е. Заварин и др., *ФТТ*, **55**, 733 (2021).

Т.В. Иванова (студ., 6 курс, ИТМО, ФТФ),  
Е.А. Хестанова (к.ф.-м.н., н.с., ИТМО, ФТФ)

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ АТОМАРНО ТОНКИХ СЛОЕВ WS<sub>2</sub> ПРИ ПЕРЕНОСЕ НА ТВЕРДУЮ ПОДЛОЖКУ

Для исследования механической деформации в монослое WS<sub>2</sub> нами была разработана специальная трансфер система [1], служащая для переноса слоев с одной подложки на другую, и контроля процесса в режиме реального времени. Возникновение деформаций фиксируется с помощью измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ), и определяется шириной экситонной линии и резонансным сдвигом спектров.

Для работы над проектом на стеклянной подложке было изготовлено два вида мембран: WS<sub>2</sub> на полимере и WS<sub>2</sub> на слое гексагонального нитрида бора (hBN).

Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) использовался неодимовый лазер TORUS с длиной волны 532 нм и мощностью 15-30 мкВт. В эксперименте луч фокусировался на образце в пятно размером 1 мкм с помощью водно-иммерсионного объектива (Olympus 60x, NA = 1,2). Для измерения деформации, возникающей в АТС в процессе переноса, составлялась карта образца по сигналу ФЛ. Перемещение пятна по монослою производилось с помощью пьезо PI AIST-NT, сигнал ФЛ записывался и анализировался спектрометром (Horiba LabRAM HR).

В первой серии эксперимента вследствие того, что WS<sub>2</sub> находился на подложке с высоким значением  $\epsilon$ , наблюдалось тушение ФЛ из-за повышенного кулоновского экранирования [2]. Также, наблюдается красное смещение 5 – 6 мэВ, что соответствует нижней оценке 0,1-0,5% деформации во время переноса.

Чтобы уменьшить влияние высокой диэлектрической проницаемости между подложкой и мембраной, во второй серии экспериментов мы использовали hBN как в качестве мембраны, так и в качестве подложки. Во время инкапсуляции в hBN спектральный сдвиг ФЛ отсутствует из-за подавления механических деформаций. Однако, в данной серии экспериментов снижение интенсивности ФЛ также присутствует, что мы связываем с увеличением эффективной диэлектрической проницаемости во время двусторонней инкапсуляции нитридом бора.

Таким образом, мы экспериментально продемонстрировали влияние механических деформаций, возникающих в АТС при его переносе на твердую подложку, на изменение энергетического положения спектра ФЛ и значение интенсивности сигнала.

Мы также стремимся количественно оценить наблюдаемую деформацию и реализовать метод, который позволит уменьшить ее, для создания однородных образцов с узкой экситонной линией.

1. Иванова Т., Пермяков Д., Хестанова Е. Патент РФ № 2742761 от 10.02.2021 года.
2. Wang, G. et al. // Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides. Rev. Mod. Phys. 90, 21001 (2018).

А.А. Караборчев (студ., 4 курс, СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Д.В. Коляда (асп., 4 год, СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
В.А. Тимофеев (с.н.с., ИФП СО РАН),  
О.С. Комков (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ, каф. МНЭ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОСТРУКТУР $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$

Твёрдый раствор (тв. р-р)  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$  может быть прямозонным и принимать значения ширины запрещённой зоны от 0.2 эВ до 0.7 эВ [1], благодаря чему возможно его применение в актуальном среднем ИК диапазоне. Варьируя состав, можно получить такое соотношение  $x$  и  $y$ , при котором напряжённый слой  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$  растёт на кремнии псевдоморфно. Применение таких слоёв позволит интегрировать данный тв. р-р в кремниевую технологию. Однако возникает проблема с малой критической толщиной этого слоя, что ограничивает создание излучателей на основе объёмного тв. р-ра. Для обхода данного ограничения мы использовали  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$  псевдоморфные сверхрешетки (СР).

В работе исследовались наноструктуры со СР  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$ , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Рост осуществлялся на кремниевых подложках КДБ-10 (100) с 150 нм буферным слоем Si. СР содержали от 10 до 30 периодов. Толщина  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  в различных структурах составляла 2, 4, либо 6 нм; толщина слоёв Si у всех образцов – 7 нм. Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) исследуемых образцов происходило с помощью лазера с  $\lambda=405$  нм. Измерение спектров производилось при температуре 11 К на ИК фурье-спектрометре.

В спектрах СР со слоями  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  толщиной 2 нм наблюдался широкий сигнал ФЛ в диапазоне энергий от 0.3 до 0.8 эВ. Увеличение толщины слоёв тв. р-ра до 4 нм приводило к красному смещению сигнала, что может указывать на наблюдение квантово-размерного эффекта в СР. В то же время, наблюдается уменьшение интенсивности ФЛ в 2.5 раза, а также его сужение. У СР с 6 нм  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  сигнал ФЛ находился на уровне шума. Уменьшение интенсивности ФЛ с ростом толщины слоёв  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  можно объяснить, предположив, что тв. р-р данного состава обладает малой критической толщиной при росте на кремнии, из-за чего происходит релаксация упругих напряжений в  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ .

Было показано, что интенсивность люминесценции СР  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$  существенно повышается за счёт увеличения количества периодов СР с 10 до 30. Температурная стабильность ФЛ была достаточно высокой (ФЛ сохранялась вплоть до 160 К). Однако анализ мощностных зависимостей ФЛ выявил их сублинейный рост. Данный результат может указывать на то, что, вероятно, излучательная рекомбинация в области СР происходит с участием дефектов, выявление природы которых требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-79-10092.

1. P. Moontragoon, et al. JAP **112**, 073106 (2012).

Н.А. Костромин (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ВИФШ),  
 Г.А. Мелентьев, М.Я. Винниченко (СПбПУ, ВИФШ),  
 А.А. Саркисян (РАУ (Армения), ИФИ)

## РАЗОГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ GaN/AlGaN ЛАТЕРАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

В настоящее время активно исследуются микро- и наноструктуры на основе GaN. Это объясняется возможностью разработки на их основе приборов оптоэлектроники не только видимого, но и терагерцового (ТГц) диапазона. В работах [1, 2] исследовалась ТГц эмиссия в условиях разогрева двумерных (2D) электронов в квантовых ямах GaN/AlGaN латеральным электрическим полем. При этом основной вклад в излучение давали неравновесные (горячие) 2D электроны в [1], и неравновесные 2D плазмоны в [2]. Цель настоящей работы – исследование процессов разогрева двумерных электронов латеральным электрическим полем и рассеяния неравновесных электронов как на продольных оптических ( $LO$ ) фононах, так и на связанных плазмон-фононных модах в квантовых ямах GaN/AlGaN.

Объект расчета – треугольная квантовая яма (КЯ), формирующаяся на гетеропереходе GaN/AlGaN. В расчетах предполагалось, что электроны совершают переходы только внутри первой подзоны размерного квантования; функция распределения – фермиевская с температурой горячих электронов  $T_e$ . Расчет скорости потери энергии при рассеянии электронов на  $LO$ -фононах осуществлялся на основе [3]. Использовался подход, при котором изначально рассчитывается скорость изменения числа фононов  $dN_q/dt$  с волновым вектором  $q$ . Это позволяет ввести время жизни фонона  $\tau_q$  для учета эффекта накопления через неравновесную функцию распределения фононов  $N_q = N_{q0} + (dN_q/dt)\tau_q$ , где  $N_{q0}$  – равновесная часть функции распределения. Скорость рассеяния энергии (являющаяся функцией  $T_e$ ) рассчитывалась следующим образом:  $\langle d\varepsilon/dt \rangle = \hbar\omega_{LO}/n_s S \sum_q dN_q/dt$ , где  $n_s$  – поверхностная концентрация электронов. Экранирование фононов свободными электронами учитывалось с помощью диэлектрической проницаемости в приближении хаотических фаз. При большой концентрации двумерных электронов, последние взаимодействуют с  $LO$ -фононами и формируются связанные плазмон-фононные моды. Были произведены расчеты скорости рассеяния энергии на данных связанных модах. Для определения степени разогрева электронов, т.е. расчета зависимости  $T_e$  от электрического поля, использовалось уравнение баланса мощности  $e\mu E^2 = \langle d\varepsilon/dt \rangle$ , где  $\mu$  – подвижность,  $E$  – латеральное электрическое поле. Проведенные расчеты используются для интерпретации экспериментальных результатов, полученных в [1, 2].

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № 075-03-2021-050/5.

1. V.A. Shalygin et al. J. Appl. Phys., **109** (7), 073108 (2011).
2. V.A. Shalygin et al. J. Appl. Phys., **126** (18), 183104 (2019).
3. Л.Е. Воробьев и др. ФТП, **37** (5), 604 (2003).

## РЕГИСТРАЦИЯ САМОИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАРМОРОВСКОЙ ПРЕЦЕССИИ В ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ШУМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОГО КОНДЕНСАТА

Сравнительно недавние исследования [1] продемонстрировали экспериментальную реализацию Бозе-Эйнштейновского экситон-поляритонного конденсата - уникального управляемого состояния света, взаимодействующего с материей. Новая система открывает перспективную базу для фундаментальных и прикладных исследований ее свойств в качестве лазерного источника нового типа. Кроме того, ансамбли латерально ограниченных конденсатов интересны как элементарные единицы квантовых симуляторов. Микроскопические свойства этих новых объектов физики, однако, поняты еще не до конца. В рамках нашей работы мы показали, что применение техники спектроскопии спиновых шумов к статически не поляризованному свету, излученному конденсатом, позволяет выявить скрытые изменения в динамике этой системы.

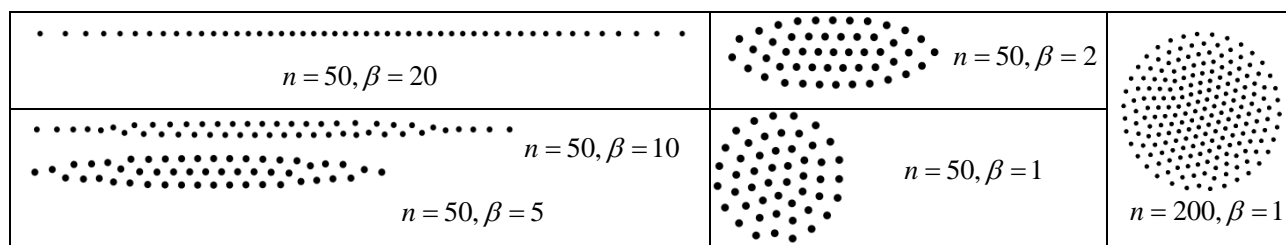
Спектроскопия спиновых шумов (ССШ) — это экспериментальный подход для исследования различного рода объектов, в том числе и полупроводниковых структур. Применение ССШ к поляритонным системам впервые было показано в работе [2], авторы которой продемонстрировали возможность определять состояние конденсата с помощью анализа поляризационных шумов света. В работе [3] предложена теоретическая модель для статистического описания в среднем неполяризованного излучения любой природы, а также продемонстрирована применимость модели к поляритонному конденсату. Используя результаты предыдущей работы, мы провели экспериментальные исследования поляризационных шумов поляритонного конденсата методом ССШ. В ходе исследования были получены зависимости шумов эллиптичности и шумов вращения азимута плоскости поляризации до и после образования поляритонного конденсата. Оказалось, что пространственная форма распределения оптического возбуждения и его интенсивность нетривиально влияют на поляризационные шумы. Однако есть одна общая закономерность: до порога генерации шумы вращения больше, чем шумы эллиптичности, а после порога шумы эллиптичности начинают преобладать над шумами вращения. Теоретические расчеты показали, что преобладание шумов эллиптичности связано с самоиндуцированной Ларморовской прецессией, частота которой зависит от мощности (подробнее см. работу [4]).

1. J. Kasprzak et al, Nature 443 (2006), p. 409—414.
2. I.I. Ryzhov et al, Phys. Rev. B 93 (2016), p. 241307.
3. G.G. Kozlov et al, Phys. Rev. A 98 (2018), p. 043817.
4. I.I. Ryzhov et al, Phys. Rev. Research 2 (2020), p. 022064.

## ТЕОРИЯ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ДВУМЕРНОМ ВИГНЕРОВСКОМ КЛАСТЕРЕ

Вигнеровский кристалл (ВК), то есть система сильно взаимодействующих электронов, которые упорядочиваются в периодическую решетку, был впервые предложен в [1]. В то время как 3D ВК является только теоретической моделью твердого тела, двумерный ВК (ДВК), в котором положительные и отрицательные заряды пространственно разнесены, потенциально возможен [2-3]. К вопросу об ДВК примыкает задача о переходе струна-зигзаг в бесконечной системе электронов, помещенных в одномерный удерживающий потенциал [4], которая может трактоваться как формирование двух слоев ДВК из одного слоя.

В настоящем докладе представлены результаты моделирования конечной системы взаимодействующих электронов, помещенных при нулевой температуре во внешний потенциал  $U(x, y) = x^2 + \beta y^2$ , ограничивающий их движение в плоскости  $(x, y)$ . Получены структура кластера, функции распределения координационных чисел внутренних и внешних электронов и найдено поверхностное натяжение края ДВК. Проанализирован переход «струна-зигзаг». Найден спектр частот малых колебаний электронов. Определена низкотемпературная теплоемкость системы.



На рисунках представлена структуры кластеров  $n$  электронов в зависимости от асимметрии потенциальной ямы  $\beta$ . При  $\beta \gg 1$  кристалл вырождается в одномерный, плотность которого уменьшается к краям из-за уменьшения давления. При уменьшении  $\beta$  до 18,7 одномерный кристалл теряет устойчивость, превращаясь в зигзагообразный, а затем наращивает число слоев. При  $\beta = 1$  кристалл занимает, в среднем, круговую область. Внутренняя часть его периодична, однако он является поликристаллом. Внешняя часть расплавлена из-за конкуренции изотропного поверхностного давления от ямы и требования минимальности энергии межэлектронного взаимодействия.

Работа поддержана грантом РФФИ №20-02-00622.

1. E.P. Wigner, Phys. Rev. 46, 1002 (1934).
2. А.В. Чаплик, ЖЭТФ 62 746 (1972).
3. P.M. Platzman and H. Fukuyama, Phys. Rev. B 10, 3150 (1974).
4. А.В. Чаплик, Письма в ЖЭТФ 31, 275(1980).

Р.С. Назаров (студ., 4 курс бак., СПбГУ, каф. фотоники),  
 И.А. Соловьёв (СПбГУ, каф. фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., с.п., СПбГУ, каф. фотоники)

## КОГЕРЕНТНАЯ ДИНАМИКА ЭКСИТОНОВ И ИХ КОМПЛЕКСОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ GaAs/AlGaAs

Один из возможных способов реализации квантовых логических элементов – обработка информации с помощью световых сигналов. Фотонное эхо является явлением, которое может быть использовано в основе квантового логического элемента.

В настоящей работе изучается характер когерентной динамики методом четырехволнового смешения и фотонного эха от экситонов в квантовой яме AlGaAs/GaAs при оптической накачке непрерывным лазерным излучением. Строится теоретическая модель и проводится компьютерное моделирование для определения спектрального положения экситонного резонанса.

Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о наличии фотонного эха в образце. Различные спектральные положения сигнала фотонного эха были соотнесены с ансамблями экситонов и их комплексов. В ходе эксперимента удалось увеличить время необратимой фазовой релаксации экситонного ансамбля с помощью накачки непрерывным лазерным излучением.

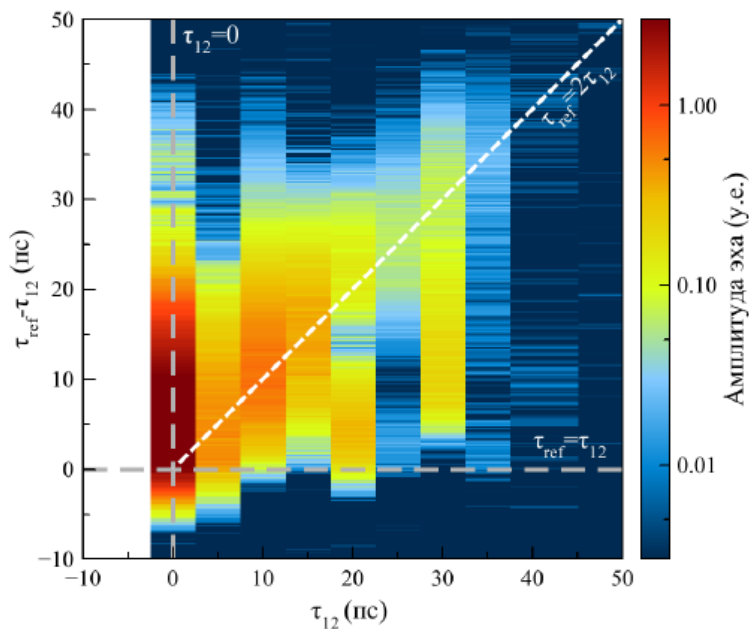


Рис. 1. Зависимость временной огибающей амплитуды фотонного эха от задержки между 1 и 2 импульсом. Пунктирная линия  $\tau_{\text{ref}} = 2\tau_{12}$  соответствует положению эха,  $\tau_{\text{ref}} = \tau_{12}$  - второго возбуждающего импульса

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника» при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-52-12046 nnio\_a).

И.Д. Николаев (студ., 2 курс маг., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ОФиФКС),  
 А.В. Иконников (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ОФиФКС)

## СПЕКТРЫ ОСТАТОЧНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР HgTe/CdHgTe С ДВОЙНЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Квантовые ямы (КЯ) HgTe обладают рядом уникальных физических свойств, наиболее известные из которых – качественная перестройка зонного спектра при изменении толщины КЯ и наличие состояния двумерного топологического изолятора [1]. Другим интересным свойством, обнаруженным в гетероструктурах HgTe/CdHgTe, является биполярная остаточная фотопроводимость (ОФП) [2, 3]. Данное свойство оказывается весьма полезным при изучении концентрационных зависимостей в случае, когда использование структур с затвором затруднительно [4]. В настоящей работе выполнены детальные исследования спектров ОФП в гетероструктурах HgTe/CdHgTe с ДКЯ и выявлены общие особенности спектров, присущие всем структурам.

Исследования спектров выполнялись при помощи монохроматора МДР-206 в диапазоне длин волн 400 – 1100 нм при  $T = 77$  К. Характерная зависимость сопротивления образца от длины волны излучения показана на рис. 1. В спектрах ОФП всех исследуемых структур выделяются две характерные особенности: локальное возрастание сопротивления при  $\lambda \approx 550$  нм и резкое возрастание сопротивления при 780 нм с последующим плавным спадом при увеличении длины волны. Выполненные транспортные измерения показывают, что при  $T = 77$  К знак эффекта Холла соответствует  $n$ -типу проводимости. Кроме того, известно, что в структурах имеется встроенное электрическое поле [5]. Сопоставление положения особенностей в спектрах ОФП с энергиями слоев структур позволяет однозначно указать на ключевую роль покровного слоя CdTe. Можно связать первую особенность с генерацией дырок с некоего уровня, связанного со спин-отщепленной зоной CdTe, и их последующим увлечением в КЯ. Вторая особенность соответствует ширине запрещенной зоны CdTe, поэтому вероятной причиной резкого возрастания сопротивления при  $\lambda > 780$  нм является прекращение генерации электронно-дырочных пар в покровном слое.

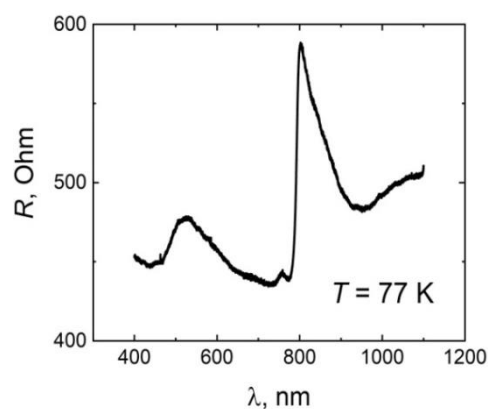


Рис. 1. Спектр остаточной фотопроводимости структуры с ДКЯ HgTe/CdHgTe

1. König M. et al., *Science.*, 318, 766 (2007).
2. К.Е. Спиринов и др., *ФТП*, 52, 1482 (2018).
3. К.Е. Спиринов и др., *ФТП*, 53, 1401 (2019).
4. A.V. Ikonnikov et al, *Semicond. Sci. Technol.*, 26, 125011 (2011).
5. L.S. Bovkun et al., *Opto-Electron. Rev.*, 27, 213, (2019).



А.А. Разова (студ., 2 курс маг., ННГУ им. Н. И. Лобачевского, РФФ),  
С.В. Морозов (к.ф.-м.н., в.н.с., ИФМ РАН)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗОГРЕВА НОСИТЕЛЕЙ НА СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgTe/CdHgTe В СРЕДНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ

Среди компактных полупроводниковых источников излучения, работающих в средней и дальней инфракрасной (ИК) областях спектра лидерами, на данный момент, являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Однако, данные лазеры не перекрывают диапазон 20 – 60 мкм из-за сильного решеточного поглощения в материалах  $A^{III}B^V$ , которые используются для изготовления ККЛ [1]. Альтернативой ККЛ могут быть межзонные лазеры на основе узкозонных материалов, в частности на основе твердого раствора HgCdTe. Перспектива использования структур на основе HgCdTe обоснована сдвигом относительно  $A^{III}B^V$  материалов решеточного поглощения в область 60 – 90 мкм и возможностью перестройки излучения по длине волны с температурой за счет изменения ширины запрещенной зоны. Тем не менее, использование эпитаксиальных пленок HgCdTe для создания лазеров также имеет свои сложности из-за того, что эффективная масса тяжелых дырок существенно превосходит эффективную массу электронов, что приводит к малым значениям пороговой энергии безызлучательного оже-процесса. Как нами было показано ранее, использование узких КЯ HgTe/CdHgTe из-за наличия участка симметричного закона дисперсии носителей существенно увеличивает пороговую энергию оже-рекомбинации по сравнению с объемным материалом и позволяет получить стимулированное излучение (СИ) вплоть до 31 мкм, что примерно в 5 раз по длине волны превышает полученные ранее результаты. С другой стороны, увеличение пороговой энергии оже-рекомбинации важно и с точки зрения увеличения максимальной температуры, при которой наблюдается СИ. Однако, с увеличением температуры растет и пороговая плотность мощности накачки наблюдения СИ, а значит и эффективная температура носителей. В данной работе проведены исследования зависимости СИ в волноводных структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe от температуры и плотности мощности оптического возбуждения в диапазонах длин волн 5 – 10 мкм и 10 – 31 мкм. Обнаружено, что при плотностях мощностей возбуждения до 100 кВт/см<sup>2</sup> максимальная температура наблюдения СИ в структурах на 5 – 10 мкм составляет примерно 200 К, в тоже время рассчитанная пороговая энергия оже-рекомбинации для этих структур лежала в пределах от 60 до 70 мэВ, что значительно больше кТ для 200 К. Таким образом, в области 5 - 10 мкм полученная максимальная температура наблюдения СИ определяется не активацией оже-рекомбинации за счет решеточного разогрева, как в структурах на 10 – 31 мкм, а «включением» оже-рекомбинации за счет электронного разогрева носителей при увеличении плотности мощности накачки возбуждения.

1. M.S. Vitiello et al., *Opt. Express.*, **23** (4), 5167-5182 (2015).

А.М. Скоморохов (студ., 4 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
каф. МНЭ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
И.П. Вейшторг (студ., 4 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
каф. МНЭ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
И.Д. Бреев (асп., 4 год, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
отд. ФТТ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
А.Н. Анисимов (к.ф.-м.н., и.о. н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
отд. ФТТ; САФУ им. М.В. Ломоносова)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАСЩЕПЛЕНИЕ СПИНОВЫХ ПОДУРОВНЕЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlN/SiC

В настоящее время спиновые подуровни в карбиде кремния представляют большой интерес при создании различных квантовых устройств. Например, их можно использовать для квантовой сенсорики и обработки информации. Центры, основой которых являются вакансии кремния со спином  $3/2$ , обладают уникальным свойством оптического выстраивания при комнатных температурах. Поэтому квантовое состояние центра можно считывать с помощью метода оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР).

В рамках данной работы было проведено исследование гетероструктур AlN/SiC для 4Н- и 6Н-политипов. При помощи методов спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и оптического детектирования магнитного резонанса на конфокальной оптической схеме одновременно определяются сдвиги фононных мод КРС 4Н/6Н-SiC и расщепление спиновых подуровней. Проанализировав сдвиги пиков КРС, было выяснено, что образуются механические напряжения на интерфейсе. Для гетероструктуры AlN/4Н-SiC максимальные значения компонент тензора напряжения наблюдаются на гетерогранице и составляют  $\sigma_{11} = -0.19$  ГПа и  $\sigma_{33} = -0.87$  ГПа. А для гетероструктуры AlN/6Н-SiC максимальные значения компонент тензора также лежат на гетерогранице и составляют  $\sigma_{11} = -0.64$  ГПа и  $\sigma_{33} = -0.15$  ГПа [1].

Для гетероструктуры AlN/4Н-SiC было обнаружено, что ОДМР резонанс центра V2 сдвинут в область более высоких частот по сравнению с ОДМР резонансом на свободной поверхности 4Н-SiC на 0.35 ГГц [2]. Сдвиг резонансной линии ОДМР в гетероструктуре AlN/6Н-SiC составляет 0.75 ГГц для центров V1/V3 и 0.5 ГГц для V2 центров [3].

1. Breev, I.D., et al. "Stress distribution at the AlN/SiC heterointerface probed by Raman spectroscopy." *Journal of Applied Physics* 129.5 (2021): 055304.
2. Бреев И.Д. и др., Письма в ЖЭТФ 114, вып. 5, 323-327, 2021.
3. Breev, I.D., et al. "Stress-controlled zero-field spin splitting in silicon carbide." *Applied Physics Letters* 118.8 (2021): 084003.

В.А. Смирнова (студ., 5 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕЙСНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И ВОЛНОВЫЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

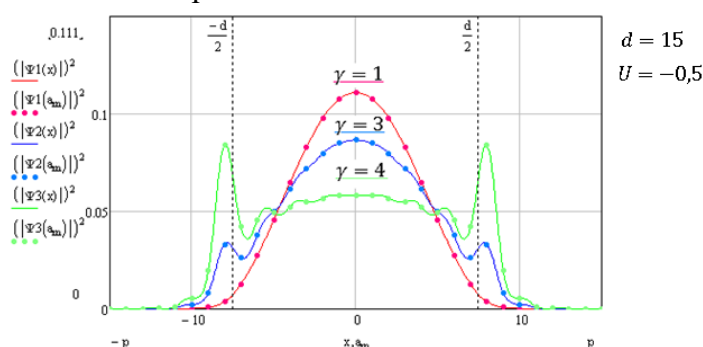
В гетероструктурах с узкими квантовыми ямами, ширина которых не превосходит несколько единиц нанометров, значительное влияние на энергетический спектр и волновые функции носителей заряда оказывают гетерограницы. Обычный континуальный метод эффективной массы, основанный на решении дифференциальных уравнений, не позволяет корректно учесть влияние интерфейсов [1]. В работе [2] предложен точный подход к решению этой задачи, учитывающий в рамках метода эффективной массы микроскопическое строение гетероструктур. В его основе лежит решение системы алгебраических уравнений, которые в континуальном приближении приводят к правильным граничным условиям для огибающих волновых функций. В настоящей работе этот метод используется для анализа интерфейсных эффектов в структуре с одиночной квантовой ямой.

Гамильтониан электрона в квантовой яме в зоне  $\Gamma_1$  имеет вид:

$$H(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m_1^*} \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} + \left[ \Delta E_c + \frac{\hbar^2}{2m_1^*} (\gamma - 1) \frac{k^2 + k'^2}{2} + \frac{\hbar^2}{2m_1^*} \Delta\beta \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}')^2 \right] f(\mathbf{k} - \mathbf{k}'),$$

где  $\Delta E_c$  – разрыв зоны  $\Gamma_1$ ,  $\gamma = m_1^*/m_2^*$  и  $\Delta\beta$  – константы, определяющие интерфейсные эффекты.

В качестве примера на рисунке показано влияние параметра  $\gamma$  на огибающую волновую функцию основного состояния электрона в квантовой яме.



Как видно из рисунка, увеличение параметра  $\gamma$  приводит к постепенной локализации электрона на гетерогранице.

1. Burt M.G. Journal of Physics: Condensed Matter. 1992. Vol. 4(32), P. 6651–6690.
2. Глинский Г.Ф., Миронова М.С. ФТП. 2014. Т. 48, № 10. С.1359–1369.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТИМУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ  
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgCdTe/CdHgTe ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Компактные полупроводниковые источники среднего инфракрасного диапазона важны для ряда применений, связанных с химическим анализом. Спектры поглощения атмосферы в среднем ИК-диапазоне обнаруживают ряд спектральных линий, соответствующих практически важным газам, включая CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, SO<sub>2</sub>, HCl и H<sub>2</sub>O [1]. Возможность измерения их концентрации в атмосфере имеет первостепенное значение, например, для мониторинга загрязнения окружающей среды. Гетероструктуры с квантовыми ямами на основе HgCdTe являются перспективной системой для создания компактных полупроводниковых источников в среднем инфракрасном диапазоне. Стимулированное излучение гетероструктур HgCdTe ранее наблюдалось на длинах волн до 3,7 мкм при температурах выше 200 К [2], но оптимальная конструкция активной области таких структур все еще обсуждается.

В данной работе исследовались спектры излучения гетероструктуры HgCdTe/CdHgTe с тремя квантовыми ямами толщиной 2,8 нм и содержанием кадмия  $X_{cd}=0,2$  при комнатной температуре. Структура, изученная в данной работе, была выращена методом молекулярно пучковой эпитаксии на подложке GaAs (013) [3]. Оптическое возбуждение структуры обеспечивалось параметрическим генератором света ближнего ИК-диапазона с Nd:YAG накачкой, который обеспечивает мощные импульсы (с пиковой интенсивностью до 100 кВт/см<sup>2</sup>) длительностью 10 нс и имеет настраиваемую длину волны от 1 до 1,8 мкм. Излучение накачки фокусировалось в пятно, полностью покрывающее образец. Излучение структуры снимали с поверхности образца и направляли в спектрометр, снабженный фотоэлектрическим детектором.

Ширина запрещенной зоны структуры, определяемая длинноволновым краем линии ФЛ, составляет 480 мэВ, а полная ширина линии на полувысоте (FWHM) равна 50 мэВ. При мощной импульсной накачке вблизи максимума линии спонтанной ФЛ возникает линия СИ. При возбуждении квантами с большей энергией обнаружен сдвиг спектра стимулированного излучения в сторону более высоких частот и его расширение при повышении мощности возбуждающего излучения. Интенсивность стимулированного излучения уменьшалась при более коротких длинах волн возбуждения, при этом его пороговое значение увеличивалось. Данный эффект мы связываем с более высокой пороговой концентрацией при более энергичном возбуждении.

Полученные результаты показывают, что гетероструктуры HgCdTe могут быть использованы для создания лазеров, работающих при комнатной температуре на длинах волн по крайней мере 2,5 мкм. Для увеличения длины волны необходимо сосредоточиться на повышении однородности структуры, подавлении оже-рекомбинации и поиске маршрутов, которые позволили бы инжектировать носители из барьерных слоев с достаточно низкой энергией.

1. I.E. Gordon et al., *J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transf.* 203, 3–69 (2017).
2. L. Cerutti, A. Vicet, and E. Tournié, *Mid-Infrared Optoelectronics*, E. Tournié and L. Cerutti, Eds., Elsevier Ltd. (2020).
3. N.N. Mikhailov et al., *Int. J. Nanotechnol.* 3(1), 120–130 (2006).

Г.С. Шидаков (студ., 4 курс бак., СПбГЭТУ, каф МНЭ),  
С.А. Хахулин (асп., 1 год, СПбГЭТУ, каф МНЭ),  
О.С. Комков (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ, каф МНЭ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР GaAs/Si МЕТОДОМ ФОТООТРАЖЕНИЯ, ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ОТЖИГА

Работа посвящена исследованию структур GaAs/Si методом фотоотражения (ФО) [1] и сравнению со спектрами GaAs/GaAs. Структура GaAs/Si была выращена молекулярно-лучевой эпитаксией со вставками из слоёв GaAs, сформированных при температуре 250°C (LT-GaAs) в качестве дислокационного фильтра (ДФ) [2]. Методом ФО было также изучено влияние отжига, проведенного при росте структур в области ДФ и выше него.

При сравнении спектров ФО GaAs/Si и GaAs/GaAs заметно смещение ширины запрещенной зоны GaAs/Si в длинноволновую область. Еще одно отличие заключается в расщеплении валентной зоны, связанным со структурными напряжениями у GaAs/Si [3,4].

Анализ спектров GaAs/Si с разными зонами отжига выявил, что образец с отжигом выше области ДФ будет обладать лучшей излучательной способностью. В качестве контрольного метода использовалась низкотемпературная фотолюминесценция.

В структуре GaAs/Si наблюдается встроенное поле, о чем свидетельствуют осцилляции Франца—Келдыша (ОФК) в спектрах ФО. По периоду ОФК можно определить величину электрического поля ( $F$ ). Для структуры с отжигом выше области ДФ поле составляет 13кВ/см, что выше, чем в образце GaAs/GaAs ( $F=6$ кВ/см). При отжиге в зоне ДФ значение электрического поля падает до  $F=4$ кВ/см. Последующий отжиг выше зоны ДФ приводит к снижению  $F$  до 3кВ/см. В основе уменьшения  $F$  лежит снижение концентрации заряженных центров ( $N$ ) в области объемного заряда. Таким образом, при выборе места отжига можно изменять  $N$  на порядок от  $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Для каждого образца проводилась оценка параметра уширения, который может быть относительным показателем совершенства структуры. Параметр уширения коррелирует с расчетами концентраций заряженных центров.

Результаты работы показывают, что предпочтительным местом отжига является область выше ДФ, так как отжиги в этой области снижают расщепление валентной зоны, в меньшей степени уменьшают излучательную способность, но обеспечивают больший параметр уширения и концентрацию заряженных центров.

Авторы выражают благодарность Абрамкину Д. С. и всем членам группы молекулярно-лучевой эпитаксии ИФП СО РАН за предоставленные образцы.

1. О.С. Комков ФТТ **63**(8), 991 (2021).
2. Д.С. Абрамкин и др. Автометрия **54**(2), 85 (2018).
3. Д.А. Винокуров и др. ФТП, **25**(6), 1022 (1991).
4. Р.В. Кузьменко ФТТ **41**(4), 725 (1999).

МЕЖСЛОЕВОЙ ЭКСИТОННЫЙ ПОЛЯРОН  
В АТОМАРНО-ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Взаимодействие между колебаниями решётки и экситонами определяет оптические и кинетические свойства квазичастиц в двумерных полупроводниках. Одна из главных особенностей двумерных кристаллов – мягкие, изгибные фононы с параболическим законом дисперсии относительно волнового вектора в плоскости материала. Они связаны со смещениями атомов, перпендикулярными плоскости материала [1].

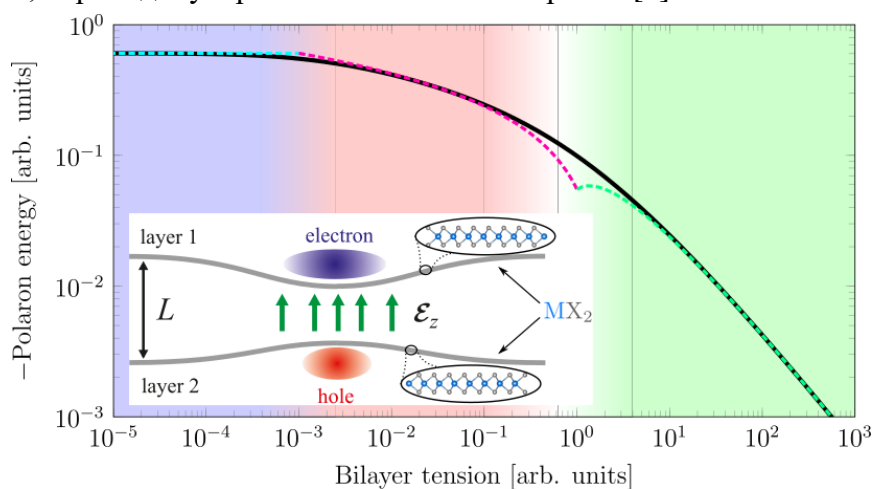


Рис. 2. Абсолютная величина энергии полярона в зависимости от натяжения слоёв. Сплошная чёрная линия демонстрирует общий вид зависимости. Пунктирные линии соответствуют предельным случаям пренебрежимо малого и большого натяжения. На вставке схематичное изображение исследуемой системы

В работе мы теоретически исследовали новый тип экситон-фононного связанного состояния – межслоевой экситонный полярон в двухслойных двумерных полупроводниках, предсказанный в [2]. Рассматривались два слоя (например, два монослоя дихалькогенидов переходных металлов), при этом электрон и дырка находятся в разных слоях (рис. 1). В описанной структуре за счет притяжения носителей заряда возникает изгиб слоев.

Были вычислены и проанализированы энергия связи и эффективная масса образующегося полярона в режимах слабой и сильной связи экситон-фононного взаимодействия. Мы изучили влияние на систему натяжения слоёв, которое приводит к более жёсткому – линейному – закону дисперсии изгибных фононов. Также был исследован ангармонический режим, в котором оказывается существенной связь изгибных деформаций с деформациями в плоскости. В рамках уравнений Фёппля – фон Кармана рассчитаны энергия ангармонического полярона и форма слоев. Найдено расстояние между слоями, при котором происходит слипание слоев за счёт кулоновского притяжения электрона и дырки.

1. M.I. Katsnelson, *The Physics of Graphene* (2020, Cambridge University Press).
2. M.A. Semina, M. M. Glazov, E. Sherman, *Ann. Phys. (Berlin)*, 2000339 (2020).

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/AlN/GaN/SiC

Постоянно растет интерес к двумерным (2D) материалам и создаваемым на их основе приборам нанопластики и плазмоники. Это стимулирует развитие бесконтактных методов исследования приборных структур, в частности методов спектроскопии в инфракрасном (ИК) и терагерцовом (ТГц) диапазонах частот. Одним из перспективных материалов являются наноструктуры AlGaN/GaN. Свойства эпитаксиальных слоев и 2D электронного газа в этих наноструктурах зависят от режимов роста и постростовых процедур (химическое и ионно-плазменное травление, металлизация контактов, пассивация поверхности и т.д.). Актуальной задачей является разработка неразрушающих методов диагностики *отдельных слоев* наноструктур, что позволило бы оптимизировать эффективность приборов в ИК и ТГц диапазонах.

В данной работе проведено моделирование спектров отражения и пропускания наноструктур AlGaN/AlN/GaN, выращенных на подложке SiC, применительно к методам ИК фурье-спектроскопии и ТГц спектроскопии во временной области. Работа нацелена на определение параметров отдельных эпитаксиальных слоев и 2D электронного газа в наноструктурах по экспериментальным спектрам отражения и пропускания.

Моделирование проводилось с помощью метода матриц переноса. Модель включала следующие среды и слои: вакуум, барьер ( $\text{SiN}_x/\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{AlN}$ ), верхняя часть буфера (нелегированный GaN), нижняя часть буфера ( $\text{GaN:C}$ ), зародышевый слой (AlN), подложка (6H-SiC), вакуум. Двумерный электронный газ, формирующийся на границе барьера и буфера, рассматривался как проводящий интерфейс и описывался моделью Друде. При описании спектров, измеряемых на фурье-спектрометре, подложка рассматривалась как некогерентный слой, что соответствует не слишком высокому спектральному разрешению, которое обеспечивает полное сглаживание осцилляций Фабри–Перо при многократных отражениях излучения внутри толстой подложки. При использовании метода ТГц спектроскопии во временной области осцилляции Фабри–Перо в подложке могут быть устранены путем выбора достаточно малого временного окна, обеспечивающего обрезание эхо-сигналов. Для этого случая расчет был соответствующим образом модифицирован.

Разработанная модель была использована для анализа экспериментальных спектров отражения и пропускания коммерческих наноструктур AlGaN/AlN/GaN/SiC [1]. Показано, что она позволяет определять параметры отдельных эпслоев и судить о совершенстве их кристаллической структуры, а также находить концентрацию и подвижность 2D электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание).

1. R.B. Adamov, D. Pashnev, V.A. Shalygin, M.D. Moldavskaya, M.Ya. Vinnichenko, et al., *Appl. Sci.* **11**, 6053 (2021).

М.Н. Батаев (лаб.-исслед., СПбГУ, SOLAB),  
 М.А. Чукаев (асп., 2 год, СПбГУ, SOLAB),  
 И.В. Игнатьев (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, SOLAB)

## УШИРЕНИЕ И СДВИГ ЭКСИТОННЫХ РЕЗОНАНСОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs

Приложение электрического поля к гетероструктурам с квантовыми ямами позволяет контролировать свет-экситонное и экситон-экситонное взаимодействия. Это является перспективным для управления резонансными оптическими нелинейностями. В достаточно широких КЯ электрическое поле поляризует или ионизует экситоны в зависимости от величины приложенного электрического поля. В данной работе мы приводим первые результаты исследования эффекта электрического поля на экситонные состояния, которые наблюдаются как резонансные особенности в спектрах отражения.

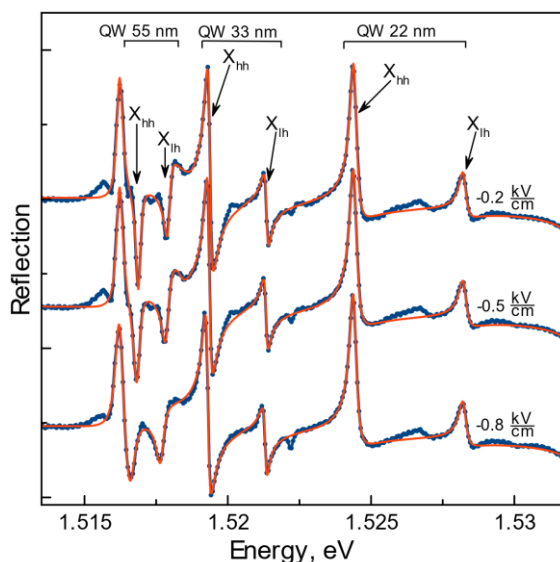


Рис. 1. Спектры гетероструктуры с тремя квантовыми ямами в электрическом поле.

Экспериментально исследованы несколько гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs различной ширины. Для наблюдения спектров отражения были разработаны прозрачные электроды, которые механически не напрягают гетероструктуру и, тем самым, не ухудшают ее качества. Примеры спектров отражения при трех значениях электрического поля приведены на рис. 1. Спектры анализировались в рамках модели диэлектрического отклика [1] и определялись основные параметры экситонных резонансов. Проведенный анализ показывает, что приложение электрического поля приводит к сдвигу экситонных резонансов в красную область спектра и их дополнительному уширению. Сдвиг экситонных резонансов обусловлен эффектом Штарка, что подтверждается микроскопическим расчетом экситонных состояний в электрическом поле, а нерадиационное уширение мы связываем с ионизацией экситонов. Дальнейшие исследования предполагают накачку экситонной системы лазерным излучением и изучение экситон-экситонного взаимодействия в электрических полях.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 19-72-20039.

1. E.L. Ivchenko, Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures, Springer, Berlin, 2004, p. 437.



М.Р. Бутаев (асп., 4 год, МИФИ, каф. ПКЭ, ФИАН),  
 В.И. Козловский (д.ф.-м.н., проф., ФИАН),  
 Я.К. Скасырский (к.ф.-м.н., ФИАН)

## ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ CdS/ZnSe/ZnSSe С РАЗРЫВАМИ ЗОН II-ТИПА, ВЫРАЩЕННОЙ ГФЭМОС

Гетероструктура CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон II-типа является перспективной активной средой для полупроводникового дискового лазера [1]. Однако оптические переходы в этой гетероструктуре еще недостаточно хорошо изучены, в частности, при высоких уровнях накачки. В данной работе исследуется структура с одиночной квантовой ямой (КЯ). Структура выращивалась методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) на подложке GaAs при температуре 450 °С. На буфере ZnSSe толщиной 300 нм последовательно выращивались слои ZnSe (толщиной  $3\pm 0.5$  нм), CdS ( $3\pm 0.5$  нм), ZnSe ( $3\pm 0.5$  нм) и покровный слой ZnSSe (80 нм). На рис. 1

представлен коротковолновый сдвиг линии излучения гетероструктуры с увеличением интенсивности накачки, характерный для гетероструктур с разрывами зон II-типа. Этот сдвиг связан с искривлением зон вблизи слоя CdS и качественно описывается согласованным решением уравнений Пуассона и Шредингера для нелегированной гетероструктуры. Лазерная генерация на структурах с аналогичными КЯ достигается в диапазоне 495-505 нм при

комнатной температуре. Однако при низком уровне возбуждения максимум линии излучения 525 нм существенно отличается от расчетного значения 570 нм, соответствующего экспериментальному значению, измеренному на аналогичных гетероструктурах, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В работе обсуждаются в качестве возможных причин наблюдаемого расхождения взаимная диффузия атомов Cd и Zn, преобразующая КЯ, и непреднамеренное легирование структуры донорной примесью Ga из подложки GaAs. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90022.

1. М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, “Наносекундный полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 496.5 нм”, *Квантовая электроника*, **50**:10 (2020), 895–899.

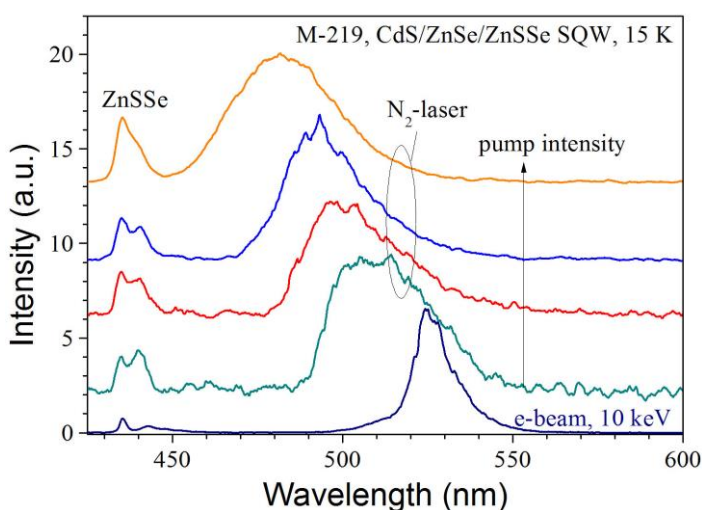


Рис. 1 Спектры фото- и катодолуминесценции структуры М-219

ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ  
ТЕМПЕРАТУРЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ РАЗБАВЛЕННОГО  
МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

В настоящее время область науки, связанная с разработкой и изучением спиновых светоизлучающих диодов (ССИД), являющихся источниками циркулярно-поляризованной люминесценции, получила значительное развитие. Перспективными материалами для использования в качестве ферромагнитных инжекторов в ССИД являются разбавленные магнитные полупроводники (РМП). На сегодняшний день задача повышения температуры Кюри для РМП является одной из наиболее актуальных в технологии спинтроники.

В данной работе сообщается о создании и исследовании излучающих свойств спинового светодиода, в котором ферромагнитный слой GaAs:Fe был встроен в гетероструктуру с квантовой ямой  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  в качестве инжектора спин-поляризованных носителей, продемонстрирована эмиссия циркулярно-поляризованной электролюминесценции (ЭЛ) в структуре GaAs:Fe/MgO/GaAs.

Была измерена магнитополевая зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ ( $P_{\text{EL}}$  (В)) в диапазоне температур 10-300 К в He криостате замкнутого цикла, которая нелинейно зависит от магнитного поля. При температурах 10, 50 и 75 К на зависимости  $P_{\text{EL}}$  (В) присутствует петля гистерезиса. Величина коэрцитивного поля при температуре 10 К составляет 56 мТ, при температуре 50 К – 38 мТ, и при 75 К – 5 мТ. При увеличении температуры выше 75 К петля гистерезиса полностью пропадает. Максимальная  $P_{\text{EL}}$ , связанная с насыщением намагниченности, составляет  $\sim 0.4$  % и слабо зависит от температуры измерений в диапазоне (10 - 300 К). Такой вид магнитополевой зависимости степени циркулярной поляризации, вероятно, связан с магнитными свойствами GaAs:Fe и обусловлен инжекцией спин-поляризованных электронов из РМП. С ростом температуры интенсивность ЭЛ монотонно уменьшается. Тем не менее, величина степени циркулярной поляризации исследованного образца не зависит от температуры измерений. Кроме того, во всём диапазоне температур насыщение зависимости поляризации наблюдалось при одинаковых значениях магнитных полей  $\sim \pm 200$  мТ. На основании полученных результатов мы предполагаем, что температура Кюри для ферромагнитного инжектора GaAs:Fe превышает 300 К, что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в работе [1] для GaAs:Fe с аналогичными технологическими параметрами формирования слоя.

Работа выполнена в рамках реализации госзадания (проект 075-03-2020-191/5).

1. Kudrin A.V., et al. // *Semicond. Sci. Technol.*, **35**, 125032 (2020).

С.В. Граф (асп., 2 год, СПбПУ, ВИФШ),  
И.С. Махов (к.ф.-м.н., н.с., НИУ ВШЭ, МЛКО),  
Г.В. Будкин (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Д.А. Фирсов (д.ф.-м.н., проф. СПбПУ, ВИФШ),  
А.А. Саркисян (д.ф.-м.н., проф., РАУ, Ереван)

## ЭФФЕКТ УВЛЕЧЕНИЯ ФОТОНОВ ПОТОКОМ ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs

Имеется значительное количество работ, посвящённых эффекту увлечения электронов в квантовых ямах потоком фотонов, который возникает при межподзонных переходах электронов с учётом передачи импульса фотонов. Однако исследования, связанные с обратным эффектом, начали проводиться относительно недавно [1]. В настоящей работе исследуются линейное по волновому вектору света и плотности электрического тока изменение показателя преломления квантовых ям и его зависимость от поляризации и длины волны излучения в области межподзонных переходов электронов.

Использовались образцы, содержащие 100 периодов квантовых ям GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs. Ширина квантовых ям составляла 7.6 нм, ширина барьеров – 9 нм. Квантовые ямы легировались кремнием. Латеральное электрическое поле прикладывалось с помощью индиевых контактов. Для исследования поляризационной зависимости эффекта образцы были выполнены в многопроходной геометрии со скошенными краями. Линейное по току изменение показателя преломления регистрировалось с помощью интерферометра Маха-Цендера, в плечи которого помещались два идентичных образца, направления протекания тока в которых были противоположны. Из интерферограммы определялось значение фазовой модуляции, связанной с изменением показателя преломления при протекании тока. В качестве источника света использовался перестраиваемый СО<sub>2</sub>-лазер. Был выполнен расчет изменения показателя преломления с током, использующий экспериментальный спектр межподзонного поглощения света и соотношение Крамерса-Кронига.

Были получены линейные зависимости изменения показателя преломления с током для излучения *s*- и *p*-поляризации. Знаки изменения показателя преломления для *s*- и *p*-поляризации взаимно противоположны, что может быть связано с различиями в механизмах фазовой модуляции для излучения разной поляризации. Спектральная зависимость эффекта определена из измерений на трех длинах волн излучения лазера. В отличие от излучения *p*-поляризации изменение показателя преломления для *s*-поляризации слабо зависит от длины волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-02-00273).

1. G.V. Budkin, I.S. Makhov, D.A. Firsov. *Journ. of Physics: Cond. Mat.* **33**(16), 165301 (2021).

СПИНОВЫЙ ТРАНСПОРТ В УСЛОВИЯХ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА  
ПРИ ФАКТОРЕ ЗАПОЛНЕНИЯ  $\nu = 2$ 

В двумерной электронной системе (симметрично легированные 31 нм квантовые ямы GaAs/ AlGaAs,  $n_e \approx 1,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $2,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu \geq 1,5 \cdot 10^7 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ) в режиме квантового эффекта Холла при факторе заполнения  $\nu = 2$  наблюдается образование магнитофермионного конденсата – коллективного состояния в ансамбле неравновесных спин-триплетных магнитоэкситонов [1]. В настоящей работе наблюдалось растекание конденсатной фазы из пятна фотовозбуждения на макроскопические расстояния. При накапливании в системе неравновесных «темных» экситонов в спектре фотолуминесценции появляются линии многочастичных экситонных комплексов, составной частью которых является триплетный спин-флип магнитоэкситон, что позволяет наблюдать растекание конденсата методом фотолуминесценции. Растекание магнитофермионного конденсата проверяется экспериментами с пространственным разнесением лазерного пятна накачки, отвечающего за образование конденсатной фазы, и пятна зондирования, в котором возбуждается фотолуминесценция. Перенос долгоживущих спиновых возбуждений происходил на макроскопическое расстояние (200 мкм). Измеренная скорость распространения спиновых возбуждений составила  $\sim 25 \text{ м/с}$  [2]. Также показано, что в транспорте плотности магнитоэкситонов на большие расстояния участвуют не все магнитоэкситоны, а только те, импульс которых близок к обратной магнитной длине. Соответственно именно они ответственны за образование магнитофермионного конденсата в квантовом холловском диэлектрике при  $\nu = 2$ .

Спин-триплетные магнитоэкситоны состоят из возбужденного электрона с перевернутым спином на пустом первом уровне Ландау и электронной вакансии (эффективной ферми-дырки) на заполненном нулевом уровне Ландау электронной системы, поэтому имеет место электрон-дырочная симметрия: масса и заряд возбужденного электрона равны массе и заряду ферми-дырки. Поскольку при диффузии спиновых возбуждений локальная пространственная плотность электронов не меняется, то перенос спиновых экситонов нельзя объяснить ни переносом заряда, ни переносом массы, а только передачей энергии и спина. Полученные знания о транспорте спин-триплетных магнитоэкситонов на большие расстояния открывают новые возможности для манипуляции спиновой степенью свободы.

1. L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, S. Dickmann, A.V. Gorbunov, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, S. Schmult, Nature Comm. 7, 13499 (2016).

2. Zagitova, A.A., Zhuravlev, A.S., Kulik, L.V., Umansky, V., Spin Transport in a Quantum Hall Insulator, Applied Sciences, 11(17), 8131 (2021).

И.М. Моисеенко (к.ф.-м.н., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
В.В. Попов (д.ф.-м.н., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
Д.В. Фатеев (к.ф.-м.н., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

## УСИЛЕНИЕ ТГЦ ПЛАЗМОНОВ В ГРАФЕНЕ ЗА СЧЕТ ПОСТОЯННОГО ТОКА, НАПРАВЛЕННОГО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО НАПРАВЛЕНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАЗМОНОВ

Графен за счет своих уникальных свойств является перспективным материалом для создания усилителей, генераторов и детекторов терагерцевого (ТГц) излучения, работающих на эффекте плазмонного резонанса [1, 2]. При решении задач электродинамики графен описывается динамической проводимостью. Проводимость графена может быть получена путем решения гидродинамических уравнений баланса энергии и импульса носителей заряда в графене, а также уравнения непрерывности в случае, когда частота межэлектронных столкновений в графене превышает частоту рассеяния импульса носителей заряда на фононах и примесях [3]. Усиление ТГц излучения в графене происходит за счет создания в графене отрицательной проводимости различными методами. В графене с постоянным током плазмонное усиление может быть достигнуто за счет эффекта Черенкова, когда фазовая скорость плазмонов меньше скорости дрейфа электронов в графене [4]. В случае, когда фазовая скорость ТГц волны превышает скорость дрейфа электронов в графене также возможно усиление в случае постоянного тока, сонаправленного с направлением распространения плазмонов в графене. Такое усиление вызвано передачей энергии постоянного тока ТГц волне через рассеяние на неоднородностях кристаллической решетки графена [5].

В настоящей работе проведено теоретическое исследование усиления плазмонов в структуре, состоящей из двух диэлектриков, окружающих графен, по которой ток направлен перпендикулярно относительно направления распространения плазмонов. Графен описывается тензорной проводимостью, выражение для которой получено в гидродинамическом приближении в рамках данной работы. Получено дисперсионное выражение для плазмонов в исследуемой структуре. Показано, что в исследуемой структуре возможно достижение отрицательных значений действительной части нескольких элементов тензора проводимости графена, что приводит к усилению плазмонов в ТГц диапазоне частот при экспериментально достижимых значениях тока дрейфа в графене.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №20-79-00224).

1. F. H. L. Koppens, T. Mueller, P. Avouris, A. C. Ferrari, M. S. Vitiello and M. Polini, *Nature Nanotech* **9**, 780 (2014).
2. T. Watanabe, T. Fukushima, Y. Yabe, S.A. Boubanga Tombet, A. Satou, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, V. Mitin, V. Ryzhii, and T. Otsuji, *New J. Phys.* **15**, 075003 (2013).
3. D. Svintsov, *Phys. Rev. B* **97**, 121405(R) (2018).
4. D. Svintsov, *Phys. Rev. B* **100**, 195428 (2019).
5. I.M. Moiseenko, V. V. Popov, and D.V. Fateev, *Phys. Rev. B* **103**, 195430 (2021).

СПЕКТРЫ НЕРАДИАЦИОННОГО УШИРЕНИЯ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ  
GaAs/AlGaAs ВО ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Доступные на сегодняшний день наноструктуры высокого качества позволяют получать спектры отражения с нерадиационным уширением сравнимым по величине с радиационным. Это позволяет с высокой точностью измерить ширину линии экситонного резонанса и надёжно разделить эту величину на радиационную и нерадиационную компоненту. При дополнительном рождении в квантовой яме (КЯ) свободных носителей с помощью лазерного возбуждения нерадиационное уширение линии экситона возрастает. Изменяя длину волны такого возбуждения, можно записать спектр возбуждения нерадиационного уширения (ВНУ) экситонного резонанса. При приложении внешнего магнитного поля такие спектры будут модифицироваться благодаря возникающим уровням Ландау свободных носителей, смещающимся с ростом магнитного поля.

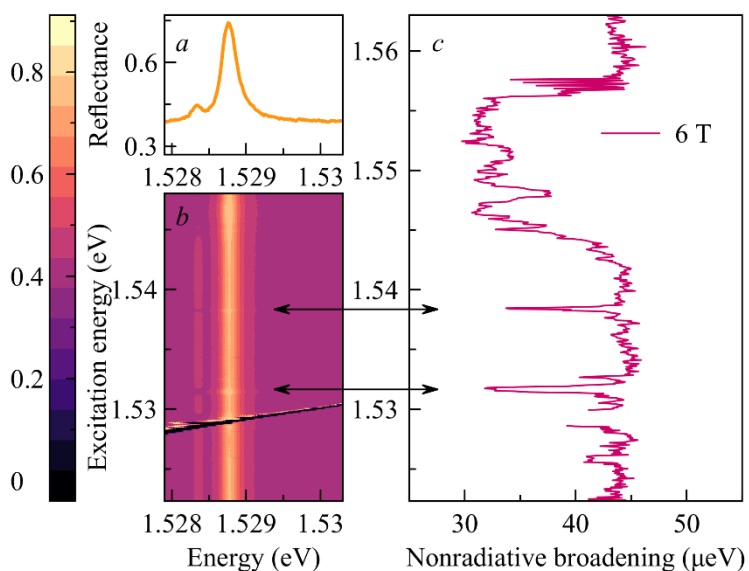


Рис. 1. Спектроскопия отражения КЯ GaAs/AlGaAs шириной 14 нм во внешнем магнитном поле 6 Тл. (a) спектр отражения циркулярно-поляризованного тяжелого экситона, (b) двумерная карта спектров отражения, при изменении энергии возбуждения, (c) спектр ВНУ экситонного резонанса.

Мы провели измерения спектров ВНУ экситонной линии в КЯ GaAs/AlGaAs шириной 14 нм. Образец находился в криостате при  $T = 1.5$  К во внешнем магнитном поле до 6 Тл. Примеры полученных спектров показаны на рисунке 1. Панель (a) демонстрирует типичный вид резонанса экситона с тяжёлой дыркой в спектре отражения. На панели (b) изображена двумерная карта, составленная из спектров отражения при сканировании длины волны возбуждающего лазера. Справа на панели (c) показан спектр ВНУ в магнитном поле 6 Тл. В нашем докладе будут представлены результаты экспериментальных измерений спектров ВНУ и результаты численных расчетов.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант №21-72-00037.

Д.А. Шапран (асп., 1 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДА ЭМПИРИЧЕСКОГО ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛА К  
РАСЧЁТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА И ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ НОСИТЕЛЕЙ  
ЗАРЯДА В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Как известно метод эффективной массы приводит к значительным погрешностям при анализе гетероструктур малых размеров, например, квантовых ям (КЯ), содержащих единицы монослоев [1]. Основная причина этого заключается в том, что в формировании связанных состояний в таких КЯ принимают участие практически все блоховские состояния опорного кристалла, соответствующие всем точкам зоны Бриллюэна, а не одна или несколько зон в небольшой области  $\mathbf{k}$ -пространства вблизи точек экстремума. Поэтому для КЯ малого размера необходимо использовать микроскопические методы расчёта, например, метод эмпирического псевдопотенциала (МЭП).

Гамильтониан КЯ в рамках МЭП в базисе с определённым волновым вектором  $|\mathbf{q}\rangle = |\mathbf{b} + \mathbf{k}\rangle$  может быть записан следующим образом [2]:

$$H_{\mathbf{b}\mathbf{k},\mathbf{b}'\mathbf{k}'} = H_{\mathbf{b}\mathbf{b}'}^B(\mathbf{k})\delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} + \Delta U_{\mathbf{b}\mathbf{k},\mathbf{b}'\mathbf{k}'},$$

где первое слагаемое в правой части представляет собой гамильтониан опорного кристалла:

$$H_{\mathbf{b}\mathbf{b}'}^B(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2(\mathbf{b} + \mathbf{k})^2}{2m_0}\delta_{\mathbf{b}\mathbf{b}'} + U_{\mathbf{b}\mathbf{b}'}, \quad U_{\mathbf{b}\mathbf{b}'} = \sum_i \frac{1}{\Omega_0} \int_V V_i(\mathbf{x}) e^{-i(\mathbf{b}-\mathbf{b}')(\mathbf{x}+\boldsymbol{\chi}_i)} d\mathbf{x},$$

а второе – возмущение, обусловленное наличием гетероструктуры (ГС):

$$\Delta U_{\mathbf{b}\mathbf{k},\mathbf{b}'\mathbf{k}'} = \sum_i \sum_{\mathbf{a}} f_i(\mathbf{a}) e^{-i(\mathbf{k}-\mathbf{k}')\mathbf{a}} \frac{1}{\Omega_0} \int_V \Delta V_i(\mathbf{x}) e^{-i(\mathbf{b}+\mathbf{k}-\mathbf{b}'-\mathbf{k}')(\mathbf{x}+\boldsymbol{\chi}_i)} d\mathbf{x}.$$

Здесь  $f_i(\mathbf{a})$  – характеристические функции, принимающие значения 0 или 1 и указывающие на замещение атомов  $i$ -ой подрешётки опорного кристалла в ячейке с номером  $\mathbf{a}$ .

В настоящей работе МЭП использовался для расчёта энергетического спектра и волновых функций электронов в КЯ GaAs/InAs различной ширины. Показано, что в формировании основного и возбуждённых состояний электронов существенную роль играют блоховские состояния всей зоны Бриллюэна.

1. Willatzen M., Lew Yan Voon L.C. The kp Method. Springer, 2009. P. 445.

2. Глинский Г.Ф. Метод эмпирического псевдопотенциала в теории гетероструктур и его применение к сверхрешёткам на основе алмазоподобных полупроводников // Доклад на Низкоразмерном семинаре ФТИ им. Иоффе. 25 января 2021г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qE7mjc4k67Q&list=PLSNEBxIM8K6Q2Q2FYoZFv4E2SZ9CAr8ej&index=30&t=6296s> (дата обращения: 25.09.2021).

М.М. Шарипова (асп., 1 год, инж.-иссл., СПбГУ, лаб. Оптики спина),  
 Е.С. Храмов (инж.-иссл., СПбГУ, лаб. Оптики спина),  
 И.В. Игнатъев (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, лаб. Оптики спина)

## ПРЕЦИЗИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИЙ РАЗМЕРНО-КВАНТОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs

Экситонные резонансы в спектрах отражения высококачественных гетероструктур могут быть смоделированы в рамках теории нелокального оптического отклика [1]. С помощью этой теории можно точно воспроизвести профиль экситонного резонанса и определить все его характеристики, такие как энергию экситона, радиационное и нерadiационное уширения, а также фазу резонансного отражения.

В данной работе экспериментально исследованы несколько высококачественных гетероструктур GaAs / AlGaAs с квантовыми ямами с разной шириной и высотой барьеров. Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Из спектров отражения этих структур были получены энергетические положения нескольких размерно-квантованных состояний тяжелых и легких экситонов. Также теоретически были рассчитаны энергии и волновые функции этих состояний. Трехмерное уравнение Шредингера численно решалось отдельно для тяжелых и легких экситонов в прямоугольной квантовой яме, методом, описанном в работе [2].

Результаты представлены на рис. 1. Полученные численно зависимости энергий экситонов от ширины  $L$  квантовой ямы аппроксимированы феноменологической кривой  $y = a/(L^b + c) + d$ . Экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются между собой. Единственным свободным параметром является ширина квантовой ямы, поскольку в исследованных структурах имеется градиент толщины эпитаксиальных слоев.

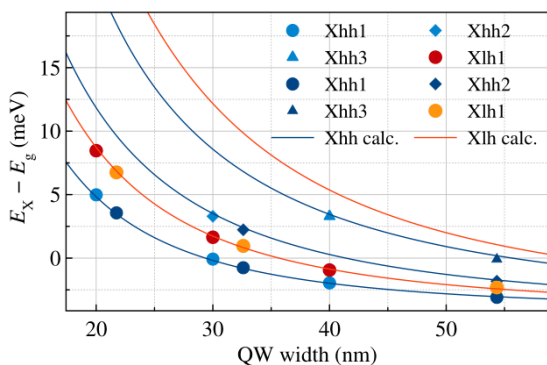


Рис. 3. Энергии тяжелых (Xhh) и легких (Xlh) экситонов в зависимости от ширины КЯ. Символы – экспериментальные данные, сплошные кривые – численные расчеты.  
 $E_g = 1519.6$  мэВ.

Поэтому расчет энергий экситонных состояний позволяет уточнять толщину слоя квантовой ямы и получать ее истинное значение. Помимо этого, с помощью полученных зависимостей можно идентифицировать линии в спектрах отражения, соответствующие различным размерно-квантованным состояниям экситонов.

Работа поддержана грантом СПбГУ № 73031758 и РФФИ № 19-02-00576а. Авторы благодарят РЦ «Нанопотоника» СПбГУ за образцы для исследований.

1. E.L. Ivchenko, Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
2. E.S. Khramtsov, et al., Radiative decay rate of excitons in square quantum wells: Microscopic modeling and experiment, J. of Appl. Phys. 119, 184301 (2016).



В.Н. Митряхин (асп., 1 год, СПбГУ, каф. фотоники),  
 П.Ю. Шапочкин (спец., СПбГУ, РЦ «Нанофотоника»),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., ст. преп., СПбГУ, каф. фотоники)

## ДИСПЕРСИЯ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНОВ В А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> ПЛОСКОМ ВОЛНОВОДЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ

Экситон-поляритоны, будучи композитными бозонами и обладающие различными нелинейными свойствами [1], интересны как для фундаментальных исследований, так и для практических применений в интегрированной оптике [2]. Обычно изучение этого явления производится в микрорезонаторах с квантовыми ямами (КЯ), добротность которых позволяет формироваться сильной экситон-фотонной связи [3]. Отражательная способность зеркал формируется конструктивной интерференцией при отражении от слоев структуры, а высокая добротность резонатора требует несколько десятков таких пар, что делает рост подобных структур сложным и долгим. Однако, достижение подобной экситон-фотонной связи возможно и при использовании полного внутреннего отражения в волноводах с квантовыми ямами [4], требующих роста гораздо меньшего количества слоев и временных затрат.

В данной работе, мы предлагаем подход к теоретическому описанию дисперсии света в плоском волноводе полного внутреннего отражения с тонкой квантовой ямой внутри волноводного слоя. Модель основывается на рассмотрении граничных условий Максвелла для слоев волновода с вводом локального диэлектрического отклика от экситонов квантовой ямы, предположенной бесконечно тонкой. Тогда, как обычно в таких системах, используют обычную феноменологическую модель связанных гармонических осцилляторов. Далее, с помощью предложенной модели, мы реконструируем экспериментальную дисперсию AlGaAs/GaAs плоского волновода с КЯ.

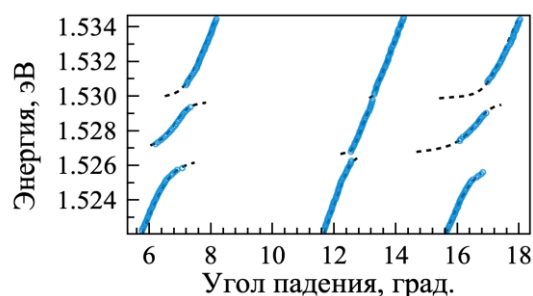


Рис. 1. Дисперсия мод волновода с квантовой ямой. Теоретическая модель – черный штрих, экспериментальные данные – синие маркеры. В эксперименте определялись положения пиков пропускания волновода при вводе света в волноводный слой через дифракционную решетку на поверхности волновода.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 20-32-70163 «Стабильность» на оборудовании РЦ «Нанофотоника» СПбГУ.

1. V. Savona, *Fifteen Years of Microcavity Polaritons*, Wiley-VCH, (2006).
2. D. Sanvitto and S. Kena-Cohen, *Nat. Mater.* 15, **1061–1073** (2016).
3. A.V. Kavokin et. al., *Microcavities*, Oxford: Oxford University Press, (2007).
4. P.Yu. Shapochkin et. al., *Opt. Lett.* 43(18), **4526** (2018).

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ПЛАНАРНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУРАХ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С МОНОСЛОЯМИ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Одним из перспективных направлений, связанных с разработкой новых оптоэлектронных устройств, является создание миниатюрного фотонного чипа, способного производить обработку информации как квантовыми, так и сверхбыстрыми классическими оптическими методами. Создание такого активного фотонного устройства, обладающего оптической нелинейностью при малых интенсивностях возбуждения, становится возможным при использовании сильного экситон-фотонного взаимодействия в полупроводниковых наноструктурах, вследствие чего возникают новые составные квазичастицы – экситонные поляритоны. Для реализации режима сильной связи была разработана планарная резонаторная структура, интегрированная с двумерными прямозонными полупроводниками – монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Данные полупроводниковые материалы обладают большой силой осциллятора и энергией связи экситонов, что

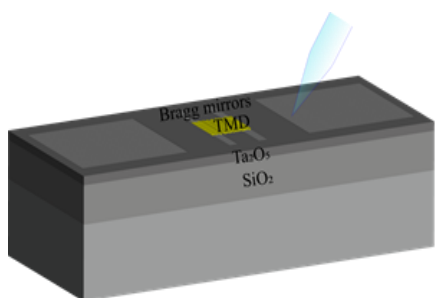


Рис.1. Схематическое изображение исследуемой структуры

позволяет с их помощью реализовать поляритонные системы, в том числе и при комнатной температуре. Структура, которая исследуется в настоящей работе, представляет собой Брэгговский резонатор, интегрированный с монослоем ДПМ. Зеркала рассматриваемого микрорезонатора изготавливаются в волноведущем слое из  $Ta_2O_5$  и разделены активной областью, на которую переносится монослой ДПМ (рис.1). Для введения электромагнитной волны в планарную структуру используются элементы ввода/вывода излучения. Геометрия резонатора оптимизирована таким образом, чтобы положение его собственных мод совпадало с экситонным резонансом в монослое ДПМ, что позволяет реализовать режим сильной связи.

В ходе работы проведено моделирование планарных микрорезонаторов, интегрированных с монослоями ДПМ в Lumerical FDTD, что позволило оптимизировать параметры зеркал резонаторной структуры для наблюдения режима сильной связи в теоретических спектрах пропускания. Для экспериментального измерения спектров пропускания свет фокусируется на элементе ввода и собирается из элемента вывода с помощью объектива Mitutoyo 50X. Сигнал, полученный таким образом, проецируется на входную щель спектрометра Princeton SP 2558 и регистрируется на CCD камере PyLoN 400BR\_eXcelon.

В ходе работы проведено моделирование планарных микрорезонаторов, интегрированных с монослоями ДПМ в Lumerical FDTD, что позволило оптимизировать параметры зеркал резонаторной структуры для наблюдения режима сильной связи в теоретических спектрах пропускания. Для экспериментального измерения спектров пропускания свет фокусируется на элементе ввода и собирается из элемента вывода с помощью объектива Mitutoyo 50X. Сигнал, полученный таким образом, проецируется на входную щель спектрометра Princeton SP 2558 и регистрируется на CCD камере PyLoN 400BR\_eXcelon.

# КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)

УДК 535.8

И.А. Мельниченко (студ., 6 курс, СПбГЭТУ, лаб. нанофотоники),  
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., СПб АУ РАН, лаб. нанофотоники)

## ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ In(As, P) ВКЛЮЧЕНИЙ В МАТРИЦЕ Si

Интеграция  $A^3B^5$  материалов с кремниевой технологией считается перспективной для дальнейшего развития фотоники и оптоэлектроники. В частности, развитие методов формирования InAs и InP наноструктур напрямую на кремниевых подложках делает возможной реализацию устройств интегральной фотоники и оптических межсоединений на чипе. В то же время совмещение InAs и InP материалов с кремниевой подложкой осложнено разностью периодов кристаллических решеток, несоответствием коэффициентов термического расширения и проблемой полярных\неполярных поверхностей.

В данной работе исследовались оптические свойства структур In(As, P) в мезах кремниевой подложки, выращенные с помощью нового эпитаксиального метода [1]. Данный

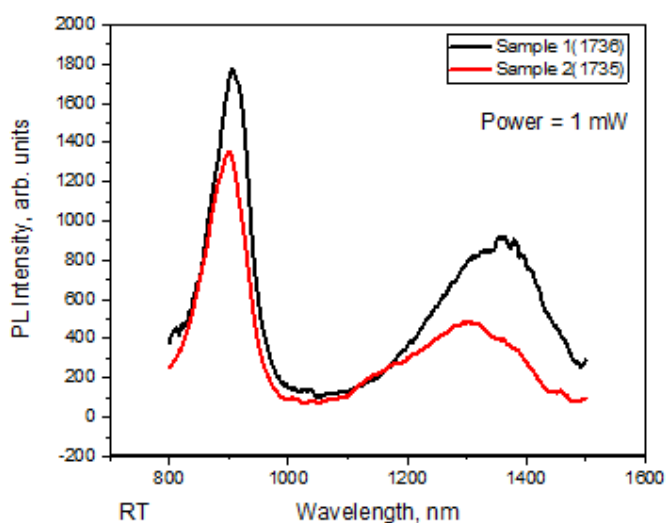


Рис. 4. Спектры ФЛ образца 1 и 2.

метод сочетает в себе подходы капельной эпитаксии и селективного роста. Процесс основан на росте наноструктуры InP в выбранной области на поверхности кремния методом металлорганической газофазной эпитаксии.

В ходе исследования оптические свойства структур In(As, P) в мезах Si (100) подложки были получены спектры ФЛ образцов, полученных в различных режимах эпитаксии (рисунок 1). При комнатной температуре образцы

демонстрировали максимум интенсивности InP на  $\sim 900$  нм и широкий пик люминесценции на длинах волн 1300-1400 нм. Можно утверждать, что образцы обладают высоким кристаллическим совершенством, и для разных режимов формирования включений In (As, P) были получены максимумы спектров ФЛ на двух разных длинах волн. Так же были получены спектры зависимости ФЛ от мощности накачки, на которых наблюдалось смещение максимума в область коротких длин волн. Температурные измерения проводились в диапазоне от 77 до 300 К. Для обоих максимумов ФЛ при уменьшении температуры наблюдалось смещение в коротковолновую область.

1. Viazmitinov D.V. et al. //Nanoscale. – 2020. – Т. 12. – №. 46. – С. 23780-23788.

К. Аубекеров (маг., 1 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
К.Н. Пунегова (маг., 1 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Р. Сергеев (маг., 1 курс, НИУ ИТМО, НИЦ световодной фотоники),  
А. Кузнецов (маг., 2 курс, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, лаб. ОГСиОМ),  
В.М. Кондратьев (асп., 2 год, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, лаб. ОГСиОМ),  
С.А. Кадинская (асп., 3 год, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, лаб. ОГСиОМ),  
С.С. Налимова (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ ZnO, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Последние исследования показывают, что газовые сенсоры на основе оксидных полупроводников рассматриваются как преобладающий и эффективный способ обнаружения различных взрывоопасных, вредных и токсичных газов. Среди основных способов увеличения чувствительности металлооксидных газовых сенсоров выделяется декорирование благородными металлами, легирование металлами/неметаллами, а также создание гетеропереходов. Композитные наноматериалы на основе оксидов металлов демонстрируют лучшие сенсорные свойства, чем отдельные оксиды, поскольку они объединяют физические и химические свойства отдельных компонентов. Несмотря на достигнутые результаты, для удовлетворения растущих требований к работе датчиков в более сложных системах необходимо дальнейшее улучшение свойств сенсорных материалов, включая чувствительность, скорость отклика/восстановления, рабочую температуру и стабильность. Таким образом, разработка композитов нового типа для достижения значительного улучшения свойств газовых сенсоров имеет важное научное и практическое значение. Целью этой работы являлась разработка композитных структур ZnO-ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> для детектирования паров изопропилового спирта.

Газочувствительные слои, состоящие из наностержней оксида цинка, были синтезированы гидротермальным методом. На основе полученных слоев были сформированы гетеронаноструктуры ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> за счет модифицирования образцов в растворе соли железа при вариации его концентрации. Рассмотрен механизм образования цинкового феррита при взаимодействии оксида цинка с сульфатом железа. Исследование образцов методом Рамановской спектроскопии показало, что для наностержней оксида цинка характерно высокое кристаллическое совершенство структуры и наличие кислородных вакансий. При модифицировании оксида цинка происходит образование цинкового феррита и оксида железа. Чувствительность образцов, полученных при концентрациях сульфата железа 0,05 моль/л и 0,1 моль/л больше чувствительности исходных наностержней оксида цинка в 4,5 раза, при дальнейшем увеличении концентрации до 0,2 моль/л полученные образцы обладают меньшей чувствительностью по сравнению с исходными наностержнями оксида цинка.

А. Кузнецов (студ., 2 курс маг., СПБАУ РАН, каф. ФиТН),  
С.В. Федина (асп., 1 год, СПБАУ РАН, каф. ФиТН),  
К.П. Котляр (м.н.с., ИАП РАН, лаб. ЭН),  
А.И. Лихачев (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Р.Р. Резник (н.с., СПБАУ РАН, лаб. ЭН),  
А.Д. Большаков (в.н.с., доц., СПБАУ РАН, лаб. ОГСиОМ)

## ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Объектом данного исследования являются ННК фосфида галлия (GaP), выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Выбор данного материала обоснован низким значением коэффициента поглощения почти во всем видимом диапазоне [1]. Таким образом появляется возможность создавать пассивные оптические элементы с большой свободой в выборе геометрии и размеров. Разработка волноводной наноструктуры малого размера требует высокой локализации электромагнитной волны. Один из перспективных методов управления светом на наномасштабах - использование плазмонных эффектов.

Как показало моделирование [2], локализация поля падающей волны в ННК GaP усиливается в присутствии капли галлия. Для подтверждения результатов моделирования экспериментально, была использована методика спектроскопии Рамановского рассеяния с локальным возбуждением. Для проведения измерений ННК GaP длиной около 4 мкм и диаметром около 120 нм с каплей Ga с ростовой подложки переносились на стеклянную, принимая горизонтальное положение. Для установления местоположения каждого ННК, на стекло предварительно наносились золотые метки с подслоем оксида индия-олова.

После процедуры РЭМ подложка с ННК была помещена в установку Рамановской спектроскопии, где было проведено картирование отклика по всей поверхности нескольких наноструктур, в том числе с разной ориентацией плоскости поляризации лазерного пучка. По результатам картирования было зафиксировано увеличение интегрального сигнала от 450 до 3000 отн. ед. по мере приближения к интерфейсу с каплей галлия. Карты, полученные при различной поляризации, показали, что при параллельной поляризации интенсивность сигнала значительно выше. Кроме усиления Рамановского рассеяния вследствие плазмонных эффектов было исследовано влияние поляризации на интенсивность фотолюминесценции одиночных ННК GaP с прямозонными вставками GaPAs. В данном случае спектры измерялись при засветке одной из торцевых граней с последующим изменением направления поляризации. Эксперимент также показал значительное увеличение интенсивности при параллельной поляризации.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (проект № 20–72–10192) и Министерству науки и высшего образования РФ (грант № FSRM–2020–00011).

1. D.E. Aspnes, A.A. Studna, Phys. Rev. B Condens. Matter., **27**, 985 (1983).
2. P. Roy, A.D. Bolshakov, J. Phys. D Appl. Phys., **53**, 295101 (2020).

Я.А. Кузнецова (студ., 1 курс маг., СПбПУ, каф. физики полупроводников и наноэлектроники),  
Ф.Б. Байрамов (м.н.с., к.ф.-м.н., АУ им. Ж.И. Алферова),  
В.В. Топоров (с.н.с., к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Б.Х. Байрамов (г.н.с., д.ф.-м.н., проф., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АУ им. Ж.И. Алферова)

## РЕКОМБИНАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs, ВЫРАЩЕННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТИ В(311) GaAs

В квантоворазмерных гетероструктурах с самоорганизованными квантовыми точками (КТ) исследования внутризонных электронных переходов привлекают значительный интерес исследователей как потенциальных объектов для создания различных принципиально новых оптоэлектронных устройств, таких как одночастотные и перестраиваемые напряжением квантово-каскадные лазеры, инфракрасные фотодетекторы, оптические компоненты квантовых технологий, фотовольтаические элементы преобразователей и др. В процессе роста таких гетерофазных структур с самоорганизованными КТ вследствие релаксации механически напряженных гетеросистем с различающимися параметрами кристаллических решеток возникают встроенные поля упругих напряжений, локализованные вблизи границы раздела двух диэлектрических сред. Они вызывают существенный изгиб зоны проводимости и валентной зоны материалов КТ и матрицы, что влияет на закономерности формирования реальных локализованных квантовых состояний с пространственно ограниченной электронно-дырочной парой – экситоном. Одним из важных методов изучения взаимодействия света с носителями заряда и динамики формирования дискретного энергетического спектра таких квантово-размерных состояний локализованных экситонов в структурах с КТ является фотолюминесценция, и наиболее широко исследуемыми и привлекательными объектами являются метастабильные массивы КТ InAs, выращенные на поверхности подложек GaAs. Нами представлены результаты экспериментального исследования динамики рекомбинационного излучения гетероэпитаксиальных структур с КТ InAs, выращенными на поверхности полуизолирующей подложки В(311) GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что для КТ InAs, с характерными размерами  $6 \pm 0.2$  нм в диаметре и  $12 \pm 0.2$  нм по высоте, полуширина (FWHM) симметричной линии основного электронного перехода экситона  $1.1690 \pm 0.0032$  мэВ при  $T = 77$  К составляет  $41.58 \pm 0.08$  мэВ, что существенно меньше типичных значений, полученных при сравнимых экспериментальных условиях, например  $\sim$  в 2 раза, в сравнении с гетероэпитаксиальными структурами с КТ InAs, выращенными на vicинальных поверхностях подложки (100) GaAs [1] с углом разориентации  $7^\circ$  относительно направления [001].

Часть работ в АУ им. Ж.И. Алферова выполнена при финансовой поддержке госзаданиями Министерства образования и науки Российской Федерации 0791-2020-0006 и 0791-2020-0008.

1. В.Г. Талалаев и др., *ФТП*, **34**, 467 (2000), **42**, 1094 (2008).

П.С. Лемешко (студ., 6 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Ю.М. Спивак (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## МУЛЬТИФОТОННАЯ МИКРОСКОПИЯ МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Одно из основных преимуществ двухфотонной микроскопии перед конфокальной микроскопией состоит в том, что возбуждение излучательных центров происходит только в фокальной плоскости. Это происходит из-за особенностей нелинейного оптического эффекта (двухфотонного возбуждения), которое лежит в основе двухфотонной микроскопии [1, 2]. Применение методов двухфотонной микроскопии может помочь в исследовании физических принципов фотолюминесценции, а также физико-химических процессов, протекающих в полупроводниковых материалах и биологических структурах, что является перспективным направлением. Работа выполнена на мультифотонном микроскопе Bergamo II (Thorlabs, США).

В данной работе проведено исследование характера фотолюминесценции мезопористого кремния, полученного электрохимическим анодным растворением монокристаллического кремния марки КДБ-1 (111) в водно-спиртовом растворе HF при плотности тока  $2 \text{ mA/cm}^2$  в течение 10 мин. Полученный в таких условиях por-Si характеризовался размерами пор порядка 10–25 нм с характерными размерами скелетной части por-Si порядка единиц нанометров. Измерения проводились при двухфотонном возбуждении фемтосекундным лазером с длинами волн 780, 800, 900 и 1 000 нм. Были найдены разделенные в пространстве центры люминесценции, излучающие на разных длинах волн в пределах видимого диапазона. Их яркость и спектры излучения отличаются от фонового свечения por-Si, а сами центры наблюдаются в областях, где присутствовали трещины и шероховатости монокристаллического кремния перед его электрохимическим травлением.

В зависимости от длины волны сканирующего пучка наблюдается «зажигание» различных центров люминесценции. При  $\lambda = 900 \text{ нм}$  и  $\lambda = 1 000 \text{ нм}$  заметно некоторое количество люминесценции в коротковолновой части видимого спектра, в то время как при более низких длинах волн такого практически не происходит. При этом, при облучении лазером с длиной волны 1 000 нм наблюдается гораздо большее количество центров люминесценции с гораздо более ярким свечением, чем при 800 нм. В докладе обсуждается характер фотолюминесценции por-Si с учетом строения и состава по глубине [3].

1. Наночастицы, наносистемы и их применение. Часть 1. Коллоидные квантовые точки. Под ред.: В.А. Мошников О.А. Александровой. Уфа: Аэтерна, 2015.
2. Alex Hayat et al 2011 Semicond. Sci. Technol. 26 083001.
3. Lenshin A.S., Kashkarov V.M., Seredin P.V., Spivak Y.M., Moshnikov V.A. XANES and IR spectroscopy study of the electronic structure and chemical composition of porous silicon on n- and p-type substrates. // Semiconductors. 2011. Vol. 45. № 9. P. 1183-1188.

К.В. Лихачев (студ., 2 курс маг., Университет ИТМО, ФТФ),  
А.В. Анкудинов (д.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.Н. Анисимов (к.ф.-м.н., и.о. н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ 6H-SiC ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Исследование возможности управления спиновым состоянием парамагнитных центров в полупроводниках при комнатной температуре является в последние годы одной из передовых тем в физике твердого тела. На сегодняшний день спиновые центры в карбиде кремния были обнаружены при помощи оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) при комнатной температуре. Семейства спиновых центров помимо возможности устойчивой работы при комнатной температуре обладают также высокими временами когерентности, яркой люминесценцией и спиновым выстраиванием при оптической накачке, которые позволяют регистрировать магнитные резонансы для счетного количества спиновых центров вплоть до одного [1].

Возможность детектирования магнитного резонанса в нанокристаллах SiC может позволить использовать их в качестве сенсоров магнитного поля. Закрепленные на острие зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) частицы могут стать сверхчувствительными датчиками, позволяющими построить картину распределения магнитного поля с нанометровым разрешением. Изменения локального магнитного поля детектируется путем оптического контроля парамагнитного резонансного перехода. Ранее в качестве подобных сенсоров были использованы наночастицы алмаза с азотно-вакансионными центрами [2].

В работе были исследованы наночастицы 6H-SiC. Политип наночастиц SiC определялся с помощью метода комбинационного рассеяния света (КРС). Спиновые центры в карбиде кремния, в частности вакансии кремния (VSi-центры) со спином  $S = 3/2$ , были созданы при помощи облучения электронами наночастиц. Получены карты пространственного распределения фотолюминесценции наночастиц, нанесенных на подложку кремния. Получены спектры ОДМР вакансий кремния (VSi-центры) со спином  $S = 3/2$  в наночастицах. Проведена оценка применимости нанокристаллов SiC, содержащих VSi-центры, для использования в качестве квантовых высокочувствительных сенсоров магнитных полей, размещенных на зонде АСМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-52-76010 ЭРА\_т.

1. Солтамов В.А. и др., Точечные дефекты в карбиде кремния как перспективная основа для спектроскопии одиночных дефектов с контролируруемыми квантовыми состояниями при комнатной температуре //Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – №. 5. – С. 877-885.

2. Degen C.L. Scanning magnetic field microscope with a diamond single-spin sensor //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 92. – №. 24. – С. 243111.



А.В. Перетокин (студ., 5 курс, ННГУ им. Лобачевского, каф. общей физики),  
М.В. Степихова (к.ф.-м.н., ИФМ РАН), А.В. Новиков (д.ф.-м.н., ИФМ РАН),  
С.А. Дьяков (к.ф.-м.н., Сколковский институт науки и технологий),  
Ж.В. Смагина (к.ф.-м.н., ИФП СО РАН)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С УПОРЯДОЧЕННЫМИ НАНООСТРОВКАМИ Ge(Si)

Одна из актуальных задач современной фотоники заключается в создании источников излучения ближнего ИК диапазона на кремнии. Перспективным подходом к решению данной проблемы является использование наноструктур Ge(Si), встроенных в двумерные фотонные кристаллы [1]. Наибольшего усиления сигнала можно добиться за счёт упорядочения наноструктур относительно отверстий фотонного кристалла [2]. Для упорядочения наноструктур используются затравочные ямки, в зависимости от параметров которых зарождение наноструктуры может происходить внутри, между или вокруг ямок [3].

Ранее для создания ФК с упорядоченными наноструктурами Ge(Si) использовался подход с предварительным упорядочением наноструктур и последующим формированием ФК в полученной структуре. В данной работе используется другой подход - здесь затравочные ямки изначально формируются достаточно большими, и в процессе роста они одновременно упорядочивают наноструктуры и при определённых параметрах могут формировать фотонный кристалл. В работе исследовалась квадратная решетка отверстий с периодами от 0.5 до 2 мкм.

Для анализа люминесцентных свойств таких структур использовались две методики: стандартная методика микро-ФЛ и методика измерений в геометрии диаграммы направленности. Суть последнего метода сводится к анализу углового распределения излучения ФК с геометрической привязкой наблюдаемого сигнала ФЛ к обратной решетке ФК. Использование последнего метода позволяет экспериментально проанализировать угловое распределение излучения отдельных мод, наблюдаемых в исследуемой структуре, и получить зонную структуру ФК.

В работе показано наличие усиления сигнала ФЛ наноструктур в исследуемых структурах, обусловленного процессами их взаимодействия с модами фотонного кристалла. Выявлена специфическая картина мод, ответственных за наблюдаемое усиление сигнала ФЛ. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными теоретических расчетов, выполненных для исследованных структур Фурье-модальным методом в формализме матрицы рассеяния.

Работа поддержана РНФ (проект #21-72-20184)

1. M.V. Shaleev et al., *Appl. Phys. Lett.* **88**, 011914 (2006).
2. A. Mahdavi et al., *Scientific Reports.* **6**, 25135 (2016).
3. M. Schatzl et al., *ACS Photonics*, **4**, 665 (2017).

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА CORE-SHELL СТРУКТУРЫ В НАНОПРОВОЛОКАХ AlGaAs

В данной работе исследуемый образец был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полупроводниковой подложке с использованием металлического катализатора роста. В результате был выращен образец с набором одномерных нитевидных нанокристаллов (ННК) AlGaAs, высота одиночной нити составляла 5–7 мкм, толщина 2 мкм. В свою очередь, нанопроволоки заращивались более широкозонным материалом, что приводило к образованию двухкомпонентной структуры (см. Рис. 1а) [1].

На данном этапе мы создали экспериментальную установку для исследования оптических свойств ННК методом изучения спектров фотолюминесценции (ФЛ). Мы изучали спектры ФЛ от ансамбля ННК. Результаты измерений и анализа представлены на рис. 1b и c. На рис. 1b показаны спектры ФЛ при различной мощности оптической накачки. Видно, что спектры ФЛ имеют два четко выраженных максимума. Такая двухпиковая структура, по-видимому, может быть связана с излучением структуры core-shell каждого отдельного ННК (рис. 1а) [1]. Разница в спектральном положении максимума двух линий ФЛ связана с увеличением содержания Al в ННК (состав  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  ядра и  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  оболочки). В то же время уширение пика, скорее всего, связано с разбросом размеров ННК в ансамбле. Второй причиной уширения может быть излучение прямых и пространственно непрямых экситонов, созданных за счет спонтанного кристалло-фазового перехода в одиночных ННК.

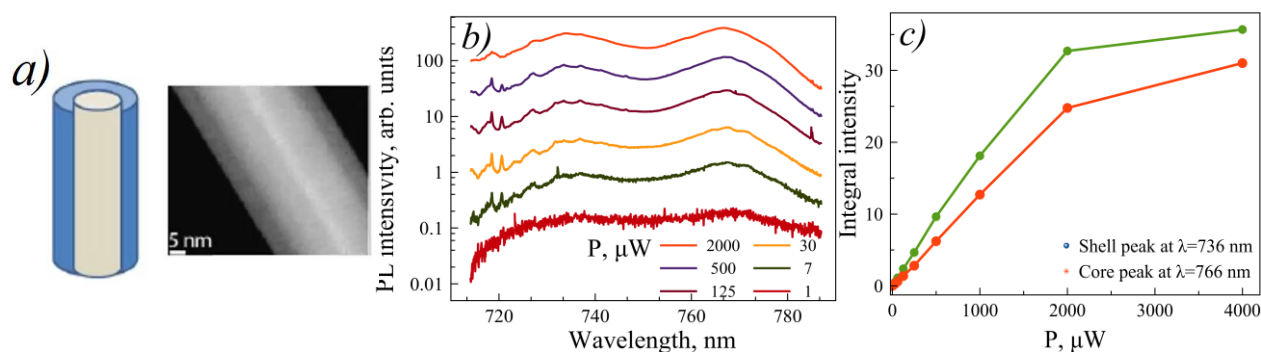


Рис. 1. (а) Схематическое изображение (слева) и изображение, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии (справа) core-shell структуры в одиночном ННК. (б) Мощностная зависимости спектров ФЛ. (с) Интегральные интенсивности core-shell пиков, измеренные при различной мощности излучения

1. V.G. Dubrovskii, I.P. Soshnikov, G.E. Cirlin, A.A. Tonkikh, Yu.B. Samsonenko, N.V. Sibirev and V.M. Ustinov. Phys. Status Solidi B, vol. 241, No. 7, pp. R30–R33 (2004).

А.А. Такаева (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ВИФШ),  
М.Я. Винниченко, Г.А. Мелентьев, Д.А. Фирсов, (СПбПУ, ВИФШ),  
Т.А. Саргсян, Д.Б. Айрапетян, А.А. Саркисян (РАУ (Армения), ИФИ),  
И.С. Махов (НИУ ВШЭ, МЛКО)

## МЕЖЗОННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И МЕЖПОДЗОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ Ge/Si

Изучение свойств квантовых точек (КТ) является одним из перспективных направлений исследований в различных областях. Путем контроля размеров и состава КТ возможно получать необходимые энергии внутризонных и межзонных оптических переходов, т. е. контролировать спектральный диапазон, в котором проявляются нужные оптические свойства. В задачу настоящей работы входило экспериментальное определение энергетического спектра дырок в КТ, что может быть использовано при создании фотоприемных структур на ИК диапазон.

Объектом исследований являются структуры с КТ Ge/Si с разным уровнем легирования. С помощью вакуумного фурье-спектрометра измерены спектры межзонной фотолюминесценции (ФЛ) в широком диапазоне температур и уровней оптической накачки. Обнаружены два пика излучения вблизи энергии кванта 800 мэВ, которые связываются с прямыми и непрямыми в реальном пространстве межзонными переходами носителей заряда. При низких  $T$  пик люминесценции, связанный с прямой рекомбинацией, слабо проявляется в спектрах ФЛ из-за низкой концентрации электронов на вовлеченных в прямую рекомбинацию состояниях. Повышение  $T$  увеличивает вероятность заполнения вышележащих состояний КТ электронами, и при высоких  $T$  в спектрах ФЛ доминирует пик излучения, связанный с прямой межзонной рекомбинацией вследствие большего перекрытия волновых функций электронов и дырок. Увеличение мощности накачки приводит к голубому сдвигу пика, связанного с непрямыми переходами, из-за изгиба зон на гетерогранице Si/Ge. Наблюдаемый сдвиг пика увеличивается с ростом легирования.

Исследованы спектры равновесного и фотоиндуцированного внутризонного поглощения излучения при различных  $T$ . В обоих случаях в спектрах обнаружены два пика для света  $p$ -поляризации, которые связаны с переходами дырок с основного и первого возбужденного состояний КТ в непрерывный спектр. Увеличение уровня легирования приводит к росту поглощения при переходах дырок из основного состояния. В спектрах фотоиндуцированного поглощения обнаружен пик вблизи энергии кванта 120 мэВ, связанный с переходами дырок из основного на второе возбужденное состояние.

Проведенные исследования могут быть полезны при разработке детекторов ИК-излучения на базе наноструктур с КТ.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № 075-03-2021-050/5 и гранта РФФИ № 20-52-05004 Арм\_а.

Т.М. Шугабаев (студ., 2 курс маг., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, каф. ФТН),  
А.С. Кулагина (м.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
В.О. Гридчин (асп., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
К.П. Котляр (м.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
А.С. Драгунова (асп., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, каф. фотоники),  
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб. эпитаксиальных нанотехнологий  
СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова)

## МЕТОДЫ СИНТЕЗА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ДЛЯ ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Наличие локализованного плазмонного резонанса (ЛПР) в наночастицах (НЧ) серебра позволяет использовать их для повышения внутренней квантовой эффективности полупроводниковых материалов, в частности усиления поверхностного комбинационного рассеяния света, интенсивности фотolumинесценции и электролюминесценции [1,2]. В свою очередь, изменяя форму и размер НЧ серебра возможно контролировать энергию ЛПР, и тем самым управлять оптическими свойствами частиц. В связи с этим, развитие методов синтеза НЧ серебра является актуальной задачей для многих применений.

Данная работа посвящена синтезу НЧ серебра в водной среде с использованием нитрата серебра, поливинилпирролидона (*PVP*, высокомолекулярный  $M = 1,3 \cdot 10^6$ ), полиэтиленгликоля (*PEG*,  $M = 8 \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ ) и цитрата натрия. Было использовано два подхода для получения нанокристаллов серебра: 1) по аналогии с работой [3], в которой функции восстановления и стабилизации НЧ были разделены между аскорбиновой кислотой и цитратом натрия; 2) с использованием *PEG* и *PVP*, где роль восстановителя и стабилизатора играет одно и то же вещество. В первом случае был получен коллоидный раствор НЧ с максимумом резонансного поглощения в области 420 нм, который обусловлен возбуждением ЛПР в частицах. Полная ширина на половине максимума (FWHM) составила 119 нм. Полученные НЧ имеют квазисферическую форму с диаметром 40 нм и обладают малой дисперсией по размеру. Нанокристаллы серебра, синтезированные с помощью *PVP* также обладают резонансным поглощением с максимумом на 433 нм и FWHM порядка 150 нм. При этом было обнаружено, что спустя 2 недели максимум резонансного поглощения в НЧ, синтезированных с помощью *PVP*, увеличился в 4 раза. Для коллоидного раствора, полученного с помощью *PEG* характерно сильное поглощение на 301 нм, связанное с образованием кластеров  $Ag_n$  ( $n < 5$ ) и относительно слабое поглощение на ЛПР в НЧ серебра.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности оптоэлектронных устройств видимого спектрального диапазона.

1. Gu X. et al. *Nanoscale research letters*. **6(1)**, 1-12. (2011).
2. Babich E. et al. *Nanomaterials*. **10(9)**, 1849. (2020).
3. Matyushkin, L.V. et al. *Technical Physics Letters*, **44(4)**, 331-333. (2018).

## СПЕКТР ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БИЭКСИТОНА В ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ ПРИ НАЛИЧИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Теоретически рассмотрены биэкситонные состояния в сильно сплюснутой эллипсоидальной квантовой точке (ССЭКТ) при наличии магнитного поля. Получена энергия системы в зависимости от геометрических параметров квантовой точки в рамках вариационной теории. Получена зависимость спектра фотолюминесценции магнетобиэкситона как функция от падающего света и температуры для кроссоверных состояний. Приведены зависимости спектра фотолюминесценции биэкситона при разных значениях магнитного поля и геометрических параметров (большая и малая полуоси эллипсоида). Приведены сравнительные графики спектра фотолюминесценции биэкситона без магнитного поля и при наличии магнитного поля.

Рассмотрим непроницаемую ССЭКТ (рис. 1) при наличии магнитного поля. Тогда потенциальная энергия частицы в цилиндрических координатах запишется в виде

$$U_{conf}(\rho, \varphi, Z) = \begin{cases} 0, & \frac{\rho^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} \leq 1 \\ \infty, & \frac{\rho^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} > 1 \end{cases}, \quad a^2 \gg c^2, \quad (1)$$

где  $c$  и  $a$  соответственно, малая и большая полуоси ССЭКТ.

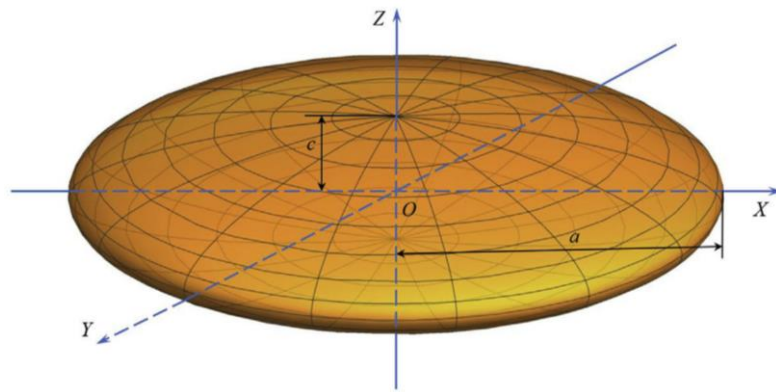


Рис. 1. Сильно сплюснутая эллипсоидальная квантовая точка.

Гамильтониан биэкситонной системы с учетом магнитного поля будет иметь следующий вид:

$$\hat{H}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_a, \vec{r}_b) = \sum_j \frac{1}{2m_j^*} \left( \hat{P}_j + \frac{e}{s} \vec{A}_j \right)^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \frac{q_i q_j}{\varepsilon |\vec{r}_i - \vec{r}_j|} + \sum_j U_{conf}(\vec{\rho}_j, z_j), \quad (2)$$

где  $j = \{1, 2, a, b\}$ ,  $q_{1,2} = -|e|$ ,  $q_{a,b} = |e|$ ,  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  - координаты электронов,  $\vec{r}_a$  и  $\vec{r}_b$  - координаты дырок. Здесь  $\hat{P}_j$  оператор импульса частицы,  $\vec{A}_j$  - вектор потенциала магнитного поля,  $s$  - скорость света в вакууме,  $e$  - заряд электрона. Калибровка  $A_\rho = 0, A_\varphi = \frac{1}{2} H \rho, A_z = 0$  обеспечивает условию параллельности поля в аксиальном направлении.

Д.Н. Бондаренко (асп., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),  
В.О. Гридчин (асп., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),  
Р.Р. Резник (к.ф.-м.н., м.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),  
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб., ЭН СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА InGaN НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

Тройные соединения на основе InGaN обладают прямозонной электронной структурой с шириной запрещенной зоны, варьируемой от 0.7 до 3.43 эВ в зависимости от химического состава [1]. Известно, что между InN и GaN существует большое рассогласование постоянных решеток, за счет чего при росте слоев InGaN возникают внутренние деформации, приводящие к неконтролируемому фазовому распаду выращиваемых структур [2]. Как было показано ранее, это можно преодолеть путем синтеза нитевидных нанокристаллов (ННК) [3]. Однако, практическое применение InGaN ННК для создания светоизлучающих устройств требует формирования структур разного типа проводимости.

В представленной работе впервые исследовано влияние легирующих примесей (Si и Mg) на морфологические и оптоэлектронные свойства InGaN ННК. Свойства образцов были охарактеризованы с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) и измерением вольтамперных характеристик (ВАХ) при комнатной температуре.

Результаты РЭМ показали, что нелегированный образец представляет собой плотноупакованные InGaN ННК со средней длиной порядка 2.7 мкм и диаметром порядка 100 нм. Легирование Si не оказывает существенного влияния на морфологию ННК, тогда как легирование Mg приводит к образованию массива наноструктур с конусообразными вершинами среднего диаметра у основания ~ 300 нм, у вершин ~ 20 нм. Образцы без легирования и с легированием Si демонстрируют интенсивную ФЛ в видимой области спектра. При этом нелегированный образец показывает максимум ФЛ в красной области спектрального диапазона, при легировании Si максимум сдвигается до 533 нм. При легировании Mg наблюдается гашение ФЛ. Результаты измерений ВАХ InGaN/SiC/Si показали, что нелегированный и легированный Si образцы обладают линейными зависимостями тока от напряжения, а в случае с легированием Mg ВАХ диодного типа.

Полученные результаты могут быть использованы для создания светоизлучающих устройств зеленого и красного спектрального диапазонов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (гос. зад. №0791-2020-0003) и Российского научного фонда (№ 19-72-30010).

1. H.Q.T. Bui et al., *Micromachines*, **10** (8), 492 (2019).
2. E. Roche et al., *Nanotechnology*, **29**, 465602 (2018).
3. В.О. Гридчин и др., *Письма в ЖТФ*, **47**, 32 (2021).

М.П. Ветчинников (к.х.н., инж., РХТУ им. Д.И. Менделеева, каф. ХТСиС),  
А.С. Липатьев (к.х.н., асс., РХТУ им. Д.И. Менделеева, каф. ХТСиС),  
Г.Ю. Шахгильдян (к.х.н., доц., РХТУ им. Д.И. Менделеева, каф. ХТСиС),  
С.В. Лотарев (к.х.н., доц., РХТУ им. Д.И. Менделеева, каф. ХТСиС),  
В.Н. Сигаев (д.х.н., проф., РХТУ им. Д.И. Менделеева, каф. ХТСиС)

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ СУЛЬФИДА КАДМИЯ В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Актуальным направлением в области современного оптического материаловедения является развитие подходов, направленных на пространственно-селективное формирование полупроводниковых нанокристаллов в объеме оксидных стекол под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Повышенный интерес к данной тематике обусловлен уникальными электронными и оптическими свойствами полупроводниковых нанокристаллов. Их локальное выделение в объеме стекол, реализуемое за счет многофотонного поглощения сверхкоротких лазерных импульсов и эффекта аккумуляции тепла, позволяет создавать микрообласти с управляемыми оптическими характеристиками, открывая путь к разработке новых фотонных устройств и оптической памяти.

В работе представлены результаты исследований по фемтосекундному лазерному модифицированию структуры силикатного стекла системы  $K_2O-ZnO-B_2O_3-SiO_2$  с добавкой 4 масс.% CdS. Было показано, что при облучении образца синтезированного стекла  $10^6$  лазерных импульсов с частотой повторения 100 кГц и энергией в диапазоне 20-400 нДж происходит локальное формирование микрообластей, обладающих желтой окраской и люминесценцией в спектральном диапазоне 455-800 нм при возбуждении на длинах волн 400-410 нм. Записанные микрообласти проанализировали с помощью системы микроанализа двулучепреломления CRi Ario. Было обнаружено наличие фазового сдвига в прошедшем через них свете, причем медленная ось была ориентирована перпендикулярно плоскости поляризации лазерного пучка, что ранее не наблюдалось при использовании режимов с повышенной до 1 МГц частотой повторения импульсов [1]. Было изучено влияние энергии лазерных импульсов на размер микрообластей, их спектрально-люминесцентные характеристики и значения фазового сдвига. Установлено, что воздействие  $10^6$  лазерных импульсов с энергией 400 нДж способствует формированию нанокристаллов CdS размером от 3 до 340 нм. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о возможности управления оптическими свойствами записываемых микрообластей с помощью контроля лазерно-индуцированных процессов нуклеации и роста нанокристаллов CdS.

Авторы благодарны сотрудникам Пхоханского университета науки и технологий Х.Ли и проф. Ч. Хею за проведение электронной микроскопии. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (грант FSSM-2020-0003).

1. M.P. Vetchinnikov et al., *Opt. Lett.*, **43**, 2519 (2018).

А.С. Голтаев (асп., 1 год, СПбАУ, каф. ЦВО),  
А.М. Можаров (н.с., СПбАУ, лаб. ВИЭ),  
И.С. Мухин (д.ф.-м.н., зав. лаб., СПбАУ, ВИЭ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФОТОННОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ NV-ЦЕНТРОВ В НАНОАЛМАЗАХ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С ННК GaP

Наноразмерные квантово-оптические излучатели являются основными элементами квантовой оптики и зондирования. В качестве таких источников можно использовать наноалмазы (НА) с оптически активными точечными дефектами в кристаллической решетке. Одним из наиболее изученных и полезных дефектов является азотнозамещенная вакансия или NV-центр. Спины электронов в NV-центрах можно манипулировать при комнатной температуре с помощью магнитного поля, электрического поля или оптического излучения [1]. Основная проблема, ограничивающая применение NV-центров в квантовых нанофотонных системах, связана с низкой яркостью бесфононной линии (БФЛ) при комнатной температуре из-за широкой фононной боковой полосы. Традиционный подход к проблеме увеличения скорости излучения NV-центра, а также эффективного сбора испускаемых фотонов предполагает объединение излучающих наноалмазов с оптическими нанорезонаторами или волноводами. Нитевидные нанокристаллы (ННК) из фосфида галлия (GaP) могут использоваться в качестве оптических резонансных систем, поскольку ННК GaP имеет узкую запрещенную зону и прозрачен для видимого диапазона, что идеально подходит для NV-центров.

Эпитаксиальные массивы GaP ННК были синтезированы на подложке Si (111) на установке RA-MBE Veeco GEN-III. Морфология синтезированных GaP ННК изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа. Микроспектроскопические исследования отклика ФЛ и комбинационного рассеяния света отдельных ННК и ансамбля НА были выполнены при 300 К для изучения химического состава и модуляции ФЛ собственными модами резонатора. Время жизни фотонов было получено с использованием метода TCSPC.

В данной работе разработан технологический процесс интеграции источников однофотонного излучения в резонансную систему ННК из фосфида галлия. Проанализированы оптические свойства изготовленной структуры и получены спектры ФЛ и КРС. Зависимость скорости спонтанного излучения исследовалась для системы НА, совмещенных с одиночными ННК GaP, а также для НА, осажденных на стеклянную подложку, в качестве референсного образца. Данные показали увеличение скорости спонтанного излучения при интегрировании наноалмазов с GaP ННК.

1. Maurer P.C. et al. Far-field optical imaging and manipulation of individual spins with nanoscale resolution //Nature Physics. – 2010. – Т. 6. – №. 11. – С. 912-918.



РАЗРАБОТКА НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОЛИГОМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ  
ДЛЯ УСТРОЙСТВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ФОТОНИКИ

Одной из важнейших задач современной оптики является миниатюризация оптических устройств, таких как линзы, поляризаторы и призмы, для интеграции на оптических чипах. Все эти устройства, так или иначе, изменяют фазовый фронт световой волны за счёт прохождения разными лучами различного оптического пути. Существует и другой способ изменить фазовый фронт волны – рассеянием на массиве резонансных частиц, размер которых много меньше длины волны. Такой массив называется метаповерхностью и может выполнять функцию, например, плоской линзы, имея при этом толщину всего несколько десятков нанометров [1]. Линзы на основе метаповерхностей работают за счёт отклонения луча, которое можно получить, меняя фазу, которая появляется при резонансном рассеянии на каждой следующей наночастице от 0 до  $2\pi$ . Однако один резонанс позволяет изменить фазу не более чем на  $\pi$ , поэтому, чтобы обеспечить существование нескольких резонансов вблизи интересующей длины волны, структурные элементы таких метаповерхностей делают сложной формы: V-образные элементы, кольца, цилиндры, параллелепипеды и прочие. При этом размер структурного элемента метаповерхности должен быть много меньше длины волны света – таким образом, для изготовления таких метаповерхностей необходимы долгие и дорогостоящие методы, такие как электронная литография и травление фокусированным ионным пучком.

В настоящем проекте предлагается использовать в качестве структурного элемента олигомеры, состоящие из нескольких близко расположенных наночастиц одинакового размера. Они могут быть получены при помощи лазерной абляции с использованием фемтосекундного лазера [2]. В олигомерах формируется набор нормальных мод, управлять положением которых по частоте можно, выбирая правильным образом расстояния между частицами. Данный подход позволяет упростить производство метаповерхностей.

Автором проекта был построен теоретический аппарат для анализа оптического отклика олигомеров. Обнаружено, что связь между частицами в них происходит одновременно как ближним полем, так и излучательно. Из-за излучательных потерь задача является неэрмитовой, то есть, неконсервативной. Помимо этого, из-за запаздывания гамильтониан, описывающий олигомер, зависит от своих собственных чисел, что приводит к сложному поведению собственных частот олигомеров в зависимости от расстояния между частицами [3]. Данные особенности структуры собственных мод олигомеров открывают дополнительные возможности для дизайна метаповерхностей.

1. Kildishev, A.V. et al., *Science*, **339**(6125), 1232009 (2013).
2. Chichkov B.N. et al., *Appl. Phys. A*, **63**(2), 109-115 (1996).
3. Dmitriev, A.A., Rybin, M.V. *Phys. Rev. A*, **99**(6), 063837 (2019).

В.А. Масталиева (асп., 2 год, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),  
В.В. Неплох (к.ф.-м.н., с.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В КРЕМНИЕВЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ

Создание оптоэлектронных устройств, визуализаторов инфракрасного (ИК) излучения в видимый диапазон востребовано для создания оптоэлектронных устройств [1] и подобных приборов нелинейной оптики и интенсивно набирает популярность в настоящее время. Существующие на рынке коммерческие образцы создаются на базе монокристаллов и керамики, обладающей высокой чувствительностью и требует активации светом. Такие керамические визуализаторы имеют ограничения в прозрачности и механической гибкости, излучают свет на фиксированной длине волны и не позволяют различать длины волн разного диапазона падающего ИК излучения. Данная работа предлагает новое решение для визуализации ИК-излучения на основе генерации третьей и второй гармоники света (ГТГ и ГВГ) в нитевидных нанокристаллах (ННК), перенесённых в прозрачный силикон.

В работе исследована генерация второй и третьей гармоники на массивах вертикально ориентированных ННК, инкапсулированных в плёнку силикона (силиконовую мембрану) и отделённых от ростовой подложки. ННК получены подготовкой оксидной маски на подложках кремния и последующего плазмохимического травления для формирования массивов вертикальных ННК. При микросферной литографии маской выступали плотно лежащие монослои сфер  $\text{SiO}_2$ . В результате селективного травления формируются круговые цилиндры, длиной около 6 мкм при диаметре в 1,4 мкм. Массивы ННК были инкапсулированы в полимерную матрицу и отделены от ростовой подложки, что позволяет повторно использовать ростовые подложки комбинировать различные системы материалов и создавать ультратонкие (до единиц микрон), деформируемые, прозрачные структуры большой площади (до 50 кв. см.)

Измерения сигнала ГВГ и ГТГ производились на установке ИК фемтосекундного лазера и спектрометра видимого диапазона, величина потока равнялась  $12 \cdot 10^{-3}$  мДж/см<sup>2</sup>. При этих параметрах образцы генерировали видимый невооружённым глазом сигнал во всём спектре 400-600 нм ТГ (1200-1800 нм падающего ИК излучения). На измеренных спектрах присутствовала также линия ГВГ на два-три порядка слабее ГТГ, что может быть связано с относительно большим соотношением объёма ННК к площади его поверхности.

Таким образом, в работе продемонстрированы эффективные визуализаторы ИК на мембранах ННК Si/силикона, преобразующие падающее излучение в видимое глазом излучение ГТГ.

1. Makarov, S., Kolotova, L., Starikov, S., Zywiets, U., & Chichkov, B. (2018). Resonant silicon nanoparticles with controllable crystalline states and nonlinear optical responses. *Nanoscale*, 10(24), 11403-11409.

М.А. Мкртчян (асп., 3 год, РАУ, Армения),  
 Д.Б. Айрапетян (к.ф.-м.н., доц., РАУ, Армения),  
 Э.М. Казарян (акад. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., РАУ, Армения),  
 А.А. Саркисян (д.ф.-м.н., проф., РАУ, Армения),  
 М.Я. Винниченко (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, Россия),  
 Д.А. Фирсов (д.ф.-м.н., проф., СПбПУ, Россия)

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЫРОЧНОГО ГАЗА В СИЛЬНО ВЫТЯНУТОЙ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ GeSi

Исследованы термодинамические характеристики парно-взаимодействующего дырочного газа, локализованного в сильно вытянутой эллипсоидальной квантовой точке GeSi. Потенциал парного взаимодействия моделируется осцилляторной функцией, которая зависит от квадрата расстояния между частицами. Межчастичное взаимодействие в радиальном направлении можно считать слабым по сравнению с размерным квантованием с учетом малой толщины системы в этом направлении, и поэтому мы будем рассматривать взаимодействие между частицами в осевом направлении:

$$V_{\text{int}}(1, \dots, N) = \sum_{i < j} \nu(|z_i - z_j|). \quad (1)$$

Гамильтониан системы диагоналируем и аналитически решаем. Аналитический вид спектра позволяет вычислить статистическую сумму в больцмановском приближении. На основе статистической суммы рассчитываются средняя энергия, свободная энергия, энтропия и теплоемкость парно-взаимодействующего газа. Энтропия и средняя энергия монотонно возрастают с увеличением температуры, так как повышение температуры приводит к увеличению хаоса в системе. Энтропия в случае невзаимодействующего газа немного выше, чем в случае парно-взаимодействующих газов, поскольку взаимодействие вносит дополнительный порядок в систему. С увеличением полуосей эллипсоидальной квантовой точки теплоемкость увеличивается и достигает насыщения. При этом теплоемкость увеличивается с повышением температуры, поскольку тепловое движение частиц растет.

Из вышесказанного следует, что учет взаимодействия между частицами в сильно-вытянутой эллипсоидальной квантовой точке существенно меняет поведение термодинамических свойств по сравнению со случаем невзаимодействующего газа.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № 075-03-2021-050/5 и гранта РФФИ № 20-52-05004 Арм\_a.

С.С. Савченко (м.н.с., УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ),  
А.С. Вохминцев (к.ф.-м.н., доц., УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ),  
И.А. Вайнштейн (д.ф.-м.н., проф., УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ)

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ ТУШЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЭКСИТОНОВ И ДЕФЕКТНЫХ ЦЕНТРОВ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ InP/ZnS

В настоящее время активно исследуются новые функциональные среды для оптоэлектроники на основе коллоидных квантовых точек (КТ). В структуре ядро/оболочка они демонстрируют наиболее высокий квантовый выход фотолюминесценции (ФЛ), который, однако, может сильно варьироваться от образца к образцу. Это определяется как индивидуальными свойствами отдельных нанокристаллов, так и разбросом этих свойств внутри ансамбля. Температурное тушение является одним из существенных факторов снижения эффективности указанных излучательных процессов. Более глубокое понимание фундаментальных механизмов тушения ФЛ позволит оптимизировать режимы направленного синтеза высокоэффективных эмиттеров на основе низкоразмерных полупроводниковых кристаллов.

В работе изучена температурная зависимость фотолюминесценции биосовместимых квантовых точек InP/ZnS со средним размером частиц в ансамблях 2.1; 2.3 нм, и относительной полушириной распределения 11.1; 17.4 %. Наблюдаемые изменения спектров в диапазоне от 296 до 6.5 К позволяют заключить, что исследуемое свечение формируется двумя типами переходов с участием экситонных и дефектных состояний. При этом с понижением температуры интенсивность свечения возрастает в 7 и 18 раз, соответственно. Обнаруженные эффекты неоднородного уширения спектральных характеристик указывают на существенный разброс нанокристаллов по размерам, форме и т.д. Анализ процессов тушения ФЛ свидетельствует о наличии распределения энергии активации безызлучательной релаксации возбуждений для исследуемых полос свечения. Количественно проанализированы механизмы тушения экситонной и дефект-связанной эмиссии в рамках предложенных зонных схем и с учетом гауссовых распределений для энергий соответствующих термоактивационных барьеров.

Полученные результаты указывают на доминирование переходов электрона из ядра InP в оболочку ZnS в механизмах безызлучательной рекомбинации экситонных возбуждений. Температурное тушение дефект-связанной люминесценции может быть количественно описано в рамках эквивалентной зонной модели, которая учитывает процессы термоактивационных переходов между основным состоянием и уровнями дырочных центров захвата на основе оборванных связей фосфора. В рамках приближения эффективной массы предложен подход для оценки относительной полуширины размерного распределения КТ InP и InP/ZnS в ансамбле на основе анализа эмпирических данных для первой экситонной полосы поглощения. Установлена корреляция между указанной величиной и параметрами распределений для энергии излучения и высоты термоактивационного барьера тушения ФЛ.

Т.А. Саргсян (асп., 2 год, РАУ, Армения),  
Д.Б. Айрапетян (к.ф.-м.н., доц., РАУ, Армения),  
М.Я. Винниченко (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, Россия)

## ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕРТИКАЛЬНО СВЯЗАННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЁШЛЯ-ТЕЛЛЕРА

Современные технологии выращивания квантовых наноструктур позволяют получать квантовые точки (КТ) с заранее заданными геометрическими формами и размерами. Контролируя рост КТ, можно изменять дискретный энергетический спектр последнего, от чего, в свою очередь, сильно зависят его электронные и оптические свойства [1]. За счёт этого в последние десятилетия КТ нашли своё широкое применение в различных сферах науки и быта: в оптике, в электронике, в медицине и т.д. Огромный объем теоретических, экспериментальных и технологических знаний, а также уникальные свойства КТ позволяют также использовать эти структуры не только в области классических вычислений, но и в квантовых вычислениях. КТ являются одними из наиболее заслуживающих внимания кандидатов на реализацию кубитов и квантовых вентилях для обработки квантовой информации [2]. Если КТ за свою схожесть иногда называют искусственными атомами, то две КТ, помещенные друг на друга, образуют структуру, называемую вертикально связанными квантовыми точками или искусственной молекулой [3]. Возникающая связь между двумя КТ изменяет их электронную структуру, а эту модификацию также можно контролировать, контролируя, например, расстояние между точками.

В данной работе проведено теоретическое исследование линейных и нелинейных коэффициентов поглощения третьего порядка и изменения показателя преломления в системе вертикально связанных цилиндрических квантовых точек с модифицированным потенциалом Пёшля-Теллера в аксиальном направлении и параболическим потенциалом в радиальном направлении. Приведены правила отбора для внутризонных переходов. Поведение линейных, нелинейных и полных спектров поглощения и изменения показателя преломления наблюдались при различных значениях температуры, были построены соответствующие графики для различных переходов.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № 075-03-2021-050/5 и гранта РФФИ № 20-52-05004 Арм\_а.

1. T. Chakraborty, Quantum Dots: A survey of the properties of artificial atoms (1999).
2. L. Fedichkin et al., Nanotechnology, **11**, 387 (2000).
3. M. Bayer, Science, **291**, 451 (2001).

Х.С. Хачатрян (асп., 3 год, РАУ, Армения),  
 Д.Б. Айрапетян (к.ф.-м.н., доц., РАУ, Армения),  
 Э.М. Казарян (акад. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., РАУ, Армения),  
 А.А. Саркисян (д.ф.-м.н., проф., РАУ, Армения),  
 М.Я. Винниченко (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, Россия)

## ДВУХЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КВАЗИКОНИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ

В рамках теории возмущений по аналогии с теорией реального атома гелия построена модель двухэлектронной системы, локализованной в квазиконической квантовой точке (квазиконический атом гелия) (Рис.1).

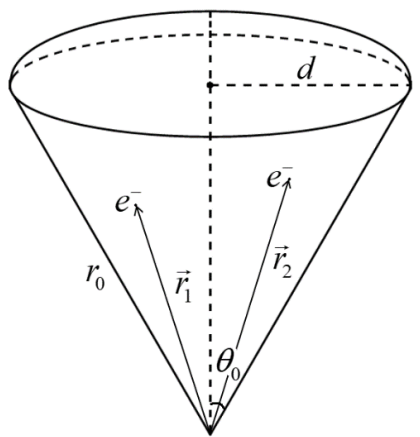


Рис.1. Квазиконическая квантовая точка

Гамильтониан данной системы имеет следующий вид:

$$\hat{H} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + V_{e-e} , \quad (1)$$

где  $\hat{H}_i = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \vec{\nabla}_i^2 + V_{conf}(\vec{r}_i)$  - Гамильтониан одной частицы ( $i = 1, 2$ ),  $\mu$  - эффективная масса электрона,  $V_{e-e}$  - кулоновское взаимодействие между электронами

$$V_{e-e} = \frac{e^2}{\varepsilon_d |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} , \quad (2)$$

где  $\varepsilon_d$  - диэлектрическая постоянная,  $e$  - заряд электрона

Наличие спина электрона учитывается в приближении Рассела-Саундерса, и волновая функция рассматривается в качестве произведения координатной и спиновой частей. Определены кулоновское и обменные поправки к уровням энергии системы. Обсуждается поведение кулоновской и обменной энергий от геометрических параметров квантовой точки. Вычислено время обмена состояниями между электронами.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № 075-03-2021-050/5 и гранта РФФИ № 20-52-05004 Арм\_а.

А.О. Шилов (асп., 3 год, УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ),  
Р.В. Камалов (вед. инж., УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ),  
А.С. Вохминцев (к.ф.-м.н., с.н.с., УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ),  
А.В. Чукин (к.ф.-м.н., доц., УрФУ, каф. ТФиПМ),  
И.А. Вайнштейн (д.ф.-м.н., гл.н.с., УрФУ, НОЦ НАНОТЕХ)

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОТУБУЛЯРНЫХ МАССИВОВ ДИОКСИДА ГАФНИЯ

Наноструктуры диоксида гафния с различной морфологией (нанотрубки, наночастицы, пленки и т.д.) обладают уникальным сочетанием электрофизических свойств. Для применения материалов на основе  $\text{HfO}_2$  в современных высокотехнологичных областях необходимо детальное понимание особенностей его электронного строения, закономерностей протекания оптически-стимулированных и люминесцентных процессов, а также фундаментальных механизмов переноса и релаксации возбуждений. Данная работа посвящена исследованию оптических свойств синтезированных массивов нанотубулярного диоксида гафния.

Нанотрубки  $\text{HfO}_2$  были получены методом электрохимического окисления гафниевой фольги, синтез проводился в потенциостатическом режиме, затем выращенные образцы были отожжены на воздухе при  $T = 700^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. Аттестация структур была проведена методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА). Согласно СЭМ, в результате синтеза образуется нанотубулярный слой диоксида гафния толщиной 6 мкм с диаметром трубок 40-60 нм. По данным энергодисперсионной спектроскопии микропримесей тяжелых элементов не выявлено. С использованием РФА показано, что исходный слой  $\text{HfO}_2$  является аморфным, после отжига диоксид переходит в моноклинную фазу.

Методом диффузного отражения проанализированы оптические свойства нанотрубок в области края собственного поглощения. С помощью формализма Кубелки-Мунка проведена оценка ширины запрещенной зоны  $E_g = 5.2 - 5.4$  эВ в предположении прямых разрешенных переходов. Полученные значения вполне согласуются с данными для наноструктурированного порошка  $m\text{-HfO}_2$  марки ГФО-1 [1]. При исследовании фотолюминесценции исходных нанотрубок обнаружено свечение с максимумом вблизи 2.3 эВ, которое эффективно возбуждается в УФ диапазоне 4.8 – 5.7 эВ. После отжига наблюдаемая эмиссия смещается в высокоэнергетическую область. В работе обсуждаются собственная природа и возможные механизмы регистрируемого свечения, которое может быть обусловлено наличием кислородных вакансий.

Работа выполнена при поддержке научного проекта Минобрнауки FEUZ-2020-0059.

1. A. Shilov et al., *J. Sib. Fed. Univ. – Math. Phys.*, **14(2)**, p. 224-229 (2021).

## ПРИБОРЫ ОПТО- И НОНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)

УДК 53.082.9, 53.082.731, 621.382.323

А.С. Андреева (студ., 4 курс бак., МГУ им. М.В. Ломоносова, ФФ),  
А.Е. Мельников (асп., 2 год, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФФ),  
Е.С. Солдатов (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова, ФФ)

### ЗАРЯДОВЫЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ ПРЕДЕЛЬНО МАЛОГО КРЕМНИЕВОГО НАНОПРОВОДА

В биологии, медицине, физике, химии – в разных областях науки для решения важнейших задач требуются высокочувствительные сенсоры зарядового типа [1]. Важным этапом на пути к решению ряда сложнейших задач стало появление сверхчувствительных сенсоров на основе одноэлектронных транзисторов, но в связи с низкими рабочими температурами переход к их широкому использованию на сегодняшний день не представляется возможным. Сейчас одним из наиболее перспективных методов создания сенсоров электрического заряда с комнатной рабочей температурой и субэлектронной чувствительностью, необходимой для создания таких инновационных устройств, как эффективный секвенатор ДНК зарядового типа, является изготовление предельно малого полупроводникового нанопровода.

Настоящая работа посвящена разработке и изготовлению таких сенсоров электрического заряда на основе кремниевых нанопроводов. Компьютерное моделирование характеристик таких нанозаполнителей показало необходимость всемерного уменьшения поперечного сечения нанопроводов для повышения их чувствительности к заряду и достижения субэлектронных значений. Целью данной работы является изготовление нанопроводов с толщиной менее 20 нм, шириной 30-50 нм со сформированными на них изолированными золотыми точками минимального размера для иммобилизации одиночных молекул полимеразы ДНК.

Измерения электронного транспорта через изготовленные нанотранзисторы с каналом в виде нанопровода из кремния с указанными выше размерами показали, что их сопротивления, лежащие в диапазоне 1-2 ГОм, сильно зависят от электрического поля, создаваемого затвором, что является необходимым условием построения сенсоров электрического заряда на их основе. При этом крутизна характеристик управления таких нанотранзисторов достигает величины 70 пА/В, что при уровне флуктуаций тока в системе, имеющем величину около  $5 \times 10^{-13}$  А/Гц<sup>1/2</sup>, приводит к оценке зарядовой чувствительности изготовленных нанотранзисторов менее  $1e/\text{Гц}^{1/2}$ , где  $e$  – заряд электрона.

По оценке, такой чувствительности достаточно для регистрации выброса одиночного протона при встраивании единичного нуклеотида в ДНК в ходе процесса секвенирования, что и необходимо для успешной работы секвенатора. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-01091.

1. Bozhev I. et al., Silicon nanowire sensor for simultaneous detection of various cancer biomarkers // *FEBS open bio*, John Wiley & Sons Inc. (United States), том 9, № Supplement 1, с. 375-376 DOI.



А.А. Захаров (студ., 1 курс маг., Уральский ФУ, каф. ТФПМ),  
Л.И. Наумова (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ УрО РАН)

## СЕНСОР ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ГИБКОГО СПИНОВОГО КЛАПАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМЫ МОСТА УИНСТОНА

В данной работе проведены исследования магниторезистивных и магнитоупругих свойств наноструктур типа «спиновый клапан», обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления. Они представляют собой комбинацию двух ферромагнетиков (ФМ), разделенных немагнитным материалом (НМ), со слоем антиферромагнетика (АФМ). В такой конструкции слой ФМ, примыкающего к АФМ, закрепляется в одном направлении и задает ось односторонней анизотропии (ООА), второй ФМ задает ось легкого намагничивания (ОЛН), которые формируются в поле при напылении.

Объектом исследования выступали образцы со следующей композицией слоев  $PI/[Ta(50)/PyCr(50)]_2/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(55)/Cu(28)/Co_{70}Fe_{10}Ni_{20}(35)/FeMn(150)/Ta(60)$ , где толщины указаны в ангстремах. Образцы изготавливались методом магнетронного напыления на гибкой подложке из полиимида (PI). Используемые тройные сплавы  $Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}$  и  $Co_{70}Fe_{10}Ni_{20}$  обладают нулевой и ненулевой магнитострикцией, соответственно.

Исследовались образцы с различным расположением осей анизотропии по отношению к направлению механических напряжений. Установлено, что при  $ООА||ОЛН||u||H$  имеет место наибольшее изменение магнитосопротивления при изгибе, где  $u$  – вектор деформации.

Методом оптической литографии изготовлен сенсор изгиба с использованием схемы моста Уинстона. Выходные характеристики сенсора представлены на рис. 1.

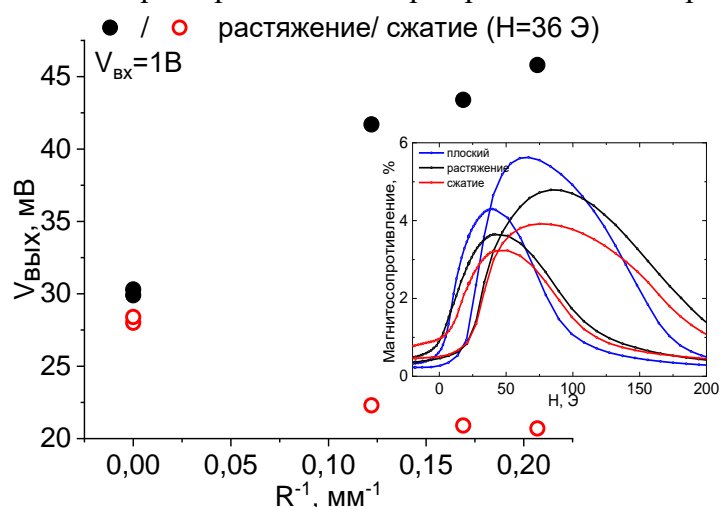


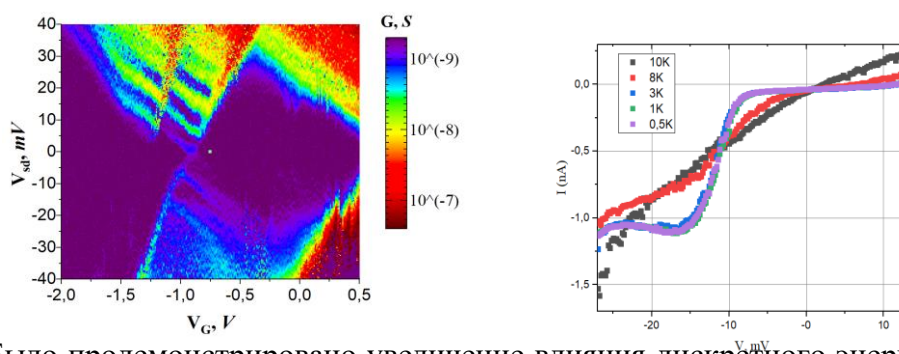
Рис. 1. Зависимость выходного напряжения от обратного радиуса кривизны изгиба  $R^{-1}$ . На вставке показаны магниторезистивные кривые спинового клапана, полученные при деформации растяжения сжатия.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» АААА-А18-118020290104-2 и при поддержке РФФИ (грант 20-42-660018 р\_а).

М.А. Колпаков (студ., 1 курс маг., МГУ им. Ломоносова., каф. ФПиК),  
 С.А. Дагесян, Д.Е. Преснов, В.В. Шорохов (к.ф.-м.н., МГУ им. Ломоносова., каф. ФПиК),  
 В.А. Крупенин (д.ф.-м.н., МГУ им. Ломоносова., каф. ФПиК),  
 О.В. Снигирев (проф., д.ф.-м.н., МГУ им. Ломоносова., каф. ФПиК)

## ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ОДНОАТОМНЫЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ МЫШЬЯКА В КРЕМНИИ

Развитие нанотехнологий открывает возможности для разработки новых наноразмерных устройств. Одним из них является одноатомный одноэлектронный транзистор, где ток представляет собой туннелирование через одиночную примесь [1]. Одноатомные устройства перспективны для создания квантовых вычислительных устройств [2]. В данной работе были исследованы электрические характеристики образцов таких устройств в диапазоне температур от 10 К до 15 мК, изготовленных по технологии сходной с [3]. В качестве примесей использованы атомы мышьяка в кремнии.



Было продемонстрировано увеличение влияния дискретного энергетического спектра примеси на электрические характеристики при охлаждении до 2 К. Дальнейшее охлаждение не оказало влияния на электрические характеристики. Это может быть вызвано различными причинами, в том числе локальным перегревом транзистора. Поэтому был предложен новый дизайн образца с улучшенным теплоотводом.

Данное исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета "Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина". в работе использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

1. Fuechsle, Martin, et al. "A single-atom transistor." *Nature nanotechnology* 7.4 (2012): 242-246.
2. Koch, Matthias, et al. "Spin read-out in atomic qubits in an all-epitaxial three-dimensional transistor." *Nature nanotechnology* 14.2 (2019): 137-140.
3. Dagesyan, S. A., et al. "Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale." *Nanotechnology* 28.22 (2017): 225304.

УДК 621.315.5

П.О. Михайлов (студ., 4 курс бак., МГУ, физ. фак., каф. физ. ПП и КЭ; ЦКТ МГУ),  
А.А. Дорофеев, А.А. Попов, С.А. Панкратов, А.С. Трифионов, В.А. Крупенин  
(МГУ, физ. фак., каф. физ. ПП и КЭ; ЦКТ МГУ),  
С.Г. Кафанов, Ю.А. Пашкин (университет Ланкастера, отд. физики),  
Д.Е. Преснов (МГУ, физ. фак., каф. физ. ПП и КЭ; ЦКТ МГУ; НИИЯФ МГУ)

## НАНОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ КАК УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВЕРХТЕКУЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

Представлен разработанный метод изготовления наномеханических резонаторов на основе подвешенных проводов из нитрида кремния, изучены резонансные характеристики экспериментальных структур и проведен прецизионный эксперимент по регистрации квантовых вихрей в сверхтекучем  $^4\text{He}$  с помощью изготовленного резонатора.

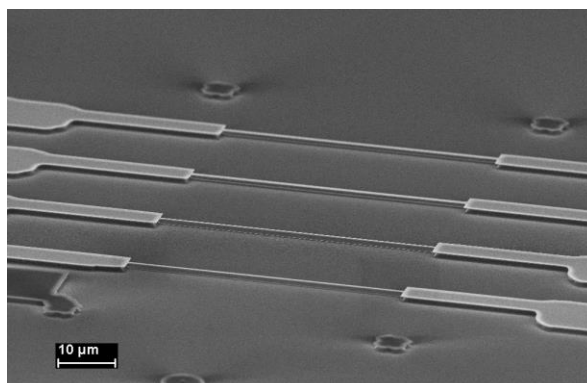


Рис. 1. SEM фотография нанопроводов

Отличительными особенностями разработанного метода являются простота и малое количество этапов изготовления.

Устройство для регистрации квантовых вихрей изготавливалось на основе подвешенного нанопровода (рис. 1) с поперечными размерами  $200 \times 100 \text{ нм}^2$ , длиной  $70 \text{ мкм}$  и покрытого  $30 \text{ нм}$  слоем алюминия. Исследование резонансных характеристик изготовленной структуры с использованием магнитодвижущего метода в вакууме при  $B = 5 \text{ Тл}$  и  $T = 10 \text{ мК}$  позволило определить значение резонансной частоты  $f_0$  ( $2,166 \text{ МГц}$ ) и добротность  $Q$  ( $2,8 \times 10^3$ ).

Резонансная частота нанопровода чрезвычайно чувствительна к внешнему воздействию. Это позволило в режиме реального времени наблюдать различные этапы взаимодействия нанопровода с квантовыми вихрями в сверхтекучем  $^4\text{He}$ . При анализе временной зависимости резонансной частоты нанопровода были выявлены: момент захвата вихря нанопроводом, их взаимодействие и освобождение вихря [1].

Исследование проведено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной программы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

1. A. Guthrie, S. Kafanov, M.T. Noble, Yu.A. Pashkin, G.R. Pickett, V. Tsepelin, A.A. Dorofeev, V.A. Krupenin, D.E. Presnov, “Nanoscale real-time detection of quantum vortices at millikelvin temperatures”. *Nature Communications* **12**, 1-6 (2021).

А.А. Попов (студ., 2 курс маг., ФФ МГУ, каф. физ. ПП и КЭ),  
А.А. Дорофеев, П.О. Михайлов, А.С. Трифонов, В.А. Крупенин  
(ФФ, каф. физ. ПП и КЭ; ЦКТ МГУ),  
С.Г. Кафанов, Ю.А. Пашкин (университет Ланкастера, отд. физики),  
Д.Е. Преснов (ФФ МГУ, каф. физ. ПП и КЭ; ЦКТ МГУ; НИИЯФ МГУ)

## НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Наноэлектромеханические резонаторы могут быть использованы как зонды в сверхтекучем гелии. Для исследования квантовых вихрей в сверхтекучих жидкостях требуются резонаторы с невысокой резонансной частотой и высокой чувствительностью. Для этого необходима большая длина при малом сечении резонатора, что в свою очередь, накладывает определенные требования на выбор материалов.

В данной работе продемонстрирован способ изготовления НЭМС на основе нитрида кремния с толщиной верхнего слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - 250 нм. Структурная стабильность, высокая механическая добротность и модуль Юнга выделяют данный материал среди аналогов.

В работе представлена уникальная технология создания подвешенных мембран из нитрида кремния с последующим формированием нанопроводов и управляющих электродов. Было изготовлено несколько серий образцов НЭМС на основе подвешенных нанопроводов с размерами  $L=50-1000$  мкм,  $h=250$  нм,  $w=200$  нм. Для изучения квантовых вихрей в жидком гелии использовался нанопровод с параметрами  $L = 70$  мкм,  $h = 130$  нм,  $w = 200$  нм. Его характеристики были измерены при температуре 10 мК и полях порядка 5 Тл, что позволило определить его добротность  $Q \sim 3 \cdot 10^5$  и резонансную частоту  $f = 2,166$  МГц. Используемые методы изготовления имеют хорошую воспроизводимость и позволяют изготавливать НЭМС, приводимые в действие магнитодвижущим методом.

1. Guthrie, Andrew, et al. "Nanoscale real-time detection of quantum vortices at millikelvin temperatures." *Nature Communications* 12.1 (2021): 1-6.
2. Presnov, D.E., et al. "High quality factor mechanical resonance in a silicon nanowire." *JETP Letters* 108.7 (2018): 492-497.
3. Гринберг, Яков С., Юрий А. Пашкин, and Евгений В. Ильичев. "Наномеханические резонаторы." *Успехи физических наук* 182.4 (2012): 407-436.

М.А. Рябова (студ., 3 курс, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, каф. ФПЭН),  
 Д.О. Филатов (д.ф.-м.н., в.н.с., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, НОЦ ФТНС)

## РЕЗОНАНСНАЯ АКТИВАЦИЯ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В МЕМРИСТОРАХ НА ОСНОВЕ $ZrO_2(Y)$ С НАНОЧАСТИЦАМИ Au

В настоящее время исследования эффекта резистивного переключения (РП) в тонких диэлектрических плёнках привлекают внимание в связи с перспективами создания на их основе элементов энергонезависимой памяти нового поколения (мемристоров) [1]. Мемристоры считаются перспективными для применения в устройствах энергонезависимой компьютерной памяти, нейроаморфных компьютерах, и т. д. Однако в настоящее время применение мемристоров сдерживается недостаточной стабильностью параметров РП, причина которой заключается в стохастической природе РП. В [2] нами обнаружено улучшение параметров РП в плёнках  $ZrO_2(Y)$  ( $\approx 12\%$  мол. Y) при наложении на треугольные переключающие импульсы синусоидального напряжения, связанное с резонансной активацией прыжков ионов  $O^{2-}$  на соседние вакансии.

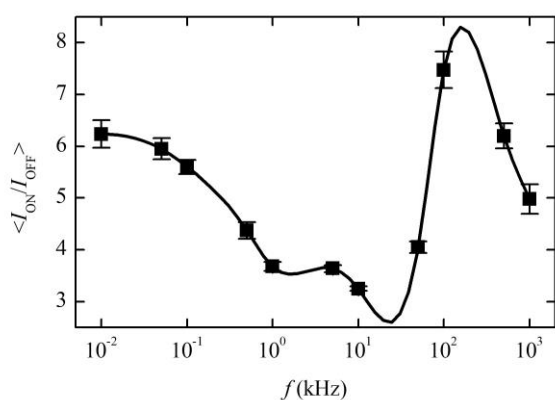


Рис. 1. Зависимость среднего отношения  $I_{ON}/I_{OFF}$  от  $f$

В настоящей работе исследована резонансная активация РП в мемристорах на базе структур  $Ta/ZrO_2(Y)(20 \text{ нм})/Pt$  со сферическими наночастицами (НЧ) Au диаметром  $\sim 2 \text{ нм}$ , встроенными в  $ZrO_2(Y)$  на расстоянии  $\sim 1 \text{ нм}$  от Pt электрода. НЧ Au концентрируют электрическое поле и стимулируют зарождение филаментов [3]. НЧ Au формировались методом послойного магнетронного осаждения структур  $ZrO_2(Y)(19 \text{ нм})/Au(2 \text{ нм})/ZrO_2(Y)(1 \text{ нм})$  с последующим отжигом.

Обнаружено, что зависимость отношения значений силы тока через мемристор в низкоомном и высокоомном состояниях  $I_{ON}/I_{OFF}$  от частоты синусоидального напряжения  $f$  имеет немонотонный характер (рис. 1), связанный с конечным временем туннелирования электронов между Pt электродом и НЧ Au. Это приводит к подавлению перезарядки НЧ Au под действием синусоидального напряжения в области высоких частот [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№18-42-520059).

1. S.H. Lee, X.Zhu, W.D. Lu, *Nano Research*, **13**, 1228 (2020).
2. М.А. Рябова, Д.О. Филатов et al., *J. Phys.: Conference Series*, **1851**, 012003 (2021).
3. Y.-J. Huang, S.-C. Chao, D.-H. Lien et al., *Sci. Rep.*, **6**, 23945 (2016).
4. R.E. Cavicchi and R. H. Silsbee, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1453 (1984).

И.Л. Калентьева (к.ф.-м.н., н.с., лаб. 2.8 НИФТИ ННГУ),  
П.Б. Демина (м.н.с., лаб. 2.8 НИФТИ ННГУ),  
М.В. Дорохин (д.ф.-м.н., зав. лаб., 2.8 НИФТИ ННГУ)

## ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИНОВЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoPt

Гетероструктуры на основе InGaAs/GaAs с ферромагнитным инжектором CoPt используются для изготовления спиновых светоизлучающих диодов (ССИД), демонстрирующих циркулярно-поляризованное излучение. При этом величина степени циркулярной поляризации электролюминесценции в таких диодах зависит как от эффективности спиновой инжекции из намагниченного слоя CoPt, так и от спиновой релаксации и прецессии, возникающих в процессе переноса спин-поляризованных носителей от ферромагнитного инжектора к активной области ССИД [1]. В данной работе представлены результаты исследования влияния ионной имплантации на характеристики ССИД InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoPt.

Полупроводниковая часть светоизлучающих диодов была сформирована методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках *n*-GaAs (100): буферный слой *n*-GaAs, квантовая яма In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As (10 нм) и покровный слой GaAs толщиной  $d_c = 150 - 200$  нм, содержащий дельта-слой углерода. Затем методом электронно-лучевого испарения в вакууме при 300°C, формировался ферромагнитный инжектор на основе сплава Co<sub>45</sub>Pt<sub>55</sub> толщиной ~ 8 нм [2]. С применением фотолитографии и химического травления изготавливались мезоструктуры диодов диаметром 500 мкм.

Полученные ССИД облучались на ускорителе ИЛУ-3 ионами He<sup>+</sup> с флюенсом  $1 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup> и энергией 20 кэВ. Исследовалось влияние ионного облучения на вольтамперные характеристики (ВАХ), интенсивность электролюминесценции ( $I_{эл}$ ) и степень циркулярной поляризации электролюминесценции ( $P_{эл}$ ) данных ССИД.

Установлено, что при ионном облучении с указанным флюенсом удается сохранить излучательные свойства квантовой ямы InGaAs/GaAs, однако,  $I_{эл}$  таких диодов снижается более чем на порядок величины вследствие проникновения дефектов в активную область. При этом наблюдается увеличение степени циркулярной поляризации электролюминесценции приблизительно в 4 раза для структур с толщинами покровного слоя 150 и 175 нм (до 1% и 1.3%, соответственно), и сохранение  $P_{эл} = 0.15$  % для диода с  $d_c = 200$  нм. Также по ВАХ установлено снижение обратного тока на порядок величины до значений  $1 \times 10^{-7}$  А при напряжении 2 В. Полученные результаты могут представлять интерес для технологии приборов спиновой оптоэлектроники.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-20186) и гранта Президента РФ (МК-445.220.2).

1. М.В. Дорохин и др., *ФТТ*, **59**, 2135 (2017).
2. А.В. Здравейшев и др., *ФТТ*, **58**, 2186 (2016).

А.А. Лазаренко (к.ф.-м.н., м.н.с., ЛНЭ СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
Е.В. Никитина, Е.В. Пирогов, А.С. Гудовских, А.И. Баранов,  
А.М. Мизеров, М.С. Соболев (СПБАУ, лаб. ВИЭ)

## СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЛОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ КРЕМНИЯ

Важной задачей современной физики является поиск новых путей для создания источников белого излучения, которые можно использовать в качестве эффективных источников света не только в системах индикации, подсветки или сигнальной аппаратуре, но и для общего освещения.

Существует несколько подходов для создания источников белого излучения: комбинация «синего» полупроводникового светодиода на основе нитрида галлия и люминофора [1]; создание варизонного материала, излучающего в широком спектральном диапазоне [2]; объединение трех светодиодов (красного, синего, зеленого) для получения белого излучения [3]. Однако наиболее перспективным направлением является создание источников белого излучения на кремнии. Это связано с тем, что кремний является одним из самых распространенных и дешевых материалов микро- и нанoeлектроники. Помимо этого, он обладает рядом преимуществ, такими как отработанная технология постростовых процессов, отличная теплопроводность, хорошие механические свойства (менее хрупкий по сравнению с GaAs или InP). Однако кремний является непрямозонным материалом, вероятность излучательных переходов в нем крайне мала, что существенно ограничивает эффективность излучателей на его основе.

В настоящей работе предлагается уникальный подход для создания эффективных источников белого излучения на кремнии - интеграция кремния и прямозонных материалов  $A^3B^5N$ . Проведены исследования светоизлучающих гетероструктур на основе разбавленных нитридов, выращенных монолитно на подложках кремния методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота. Получены вольт-амперные характеристики и спектры электролюминесценции светоизлучающих гетероструктур. Впервые в разбавленных нитридах наблюдается уникальный эффект – возникновение «белой» электролюминесценции при приложении обратного смещения. Результат получен за счет оригинальной конструкции светоизлучающей гетероструктуры и уникальных свойств азотосодержащих твердых растворов.

1. F. Caruso, M. Mosca, R. Macaluso, E. Feltn, C. Cali. *Electron. Lett.*, **48** (22), 1417 (2012).
2. C.-Y. Chen, C.N. Huang, F.C. Hwang, M.H. Hong, E.G. Lean. *USA Patent* 6163038 (2000).
3. H. Wu, X. Zhang, C. Guo, J. Xu, M. Wu, Q. Su. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **17** (6), 1160 (2005).

Н.М. Лебедева (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Ф.Ю. Солдатенков (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
М.М. Соболев (д.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
А.А. Усикова (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## ДЕФЕКТЫ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ В GaAs ПЛАВНЫХ p-i-n ПЕРЕХОДАХ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ

В работе исследовались GaAs p-i-n диоды с высоковольтными (сотни вольт) плавными  $p^0-i-n^0$ -переходами, полученными модифицированным методом жидкофазной эпитаксии за счет автолегирования фоновыми примесями в разных газовых средах (в восстановительной среде водорода и в среде инертного газа – аргона) до облучения нейтронами и после. Обнаружено, что структуры, выращенные в атмосфере аргона, обладают значительно более высокой радиационной стойкостью в сравнении с аналогами, выращенными в атмосфере водорода.

С помощью методов вольт-фарадных ( $C-V$ ) характеристик и нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), были проведены исследования  $p^+-p^0-i-n^0$ -структур на основе эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных в атмосфере водорода и аргона, до и после нейтронного облучения. В обеих группах образцов до облучения были выявлены дефекты с глубокими уровнями HL2 и HL5 в  $p^0$ - и  $n^0$ -эпитаксиальных слоях GaAs – в образцах, выращенных в атмосфере водорода, их концентрации были порядка  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , в образцах, выращенных в атмосфере аргона,  $\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , при этом концентрации нескомпенсированных примесей в  $p^0$ - и  $n^0$ -слоях, выращенных в атмосфере водорода, изменялись в диапазоне  $10^{13}$ – $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а в образцах, выращенных в атмосфере аргона – от  $10^{14}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . После облучения нейтронами обеих GaAs  $p^0-i-n^0$ -структур в DLTS-спектрах были обнаружены широкие зоны, связанные с эмиссией электронов из состояний, расположенных выше середины запрещенной зоны, кластера дефектов с акцептороподобными отрицательно заряженными ловушками  $n^0$ -слоя.

Изменения  $C-V$ -профилей для GaAs  $p^+-p^0-i-n^0$ -структур, изготовленных в атмосфере водорода и аргона, отличались после облучения. В структуре GaAs, выращенной в атмосфере водорода, в  $n^0$ -слое увеличилась эффективная концентрация носителей в зоне проводимости, емкость p-n перехода увеличилась (компенсация мелких доноров в i-слое глубокими акцепторными ловушками уменьшилась, а емкость, соответственно, увеличилась). В  $p^0-i-n^0$ -структуре на основе эпитаксиальных слоев GaAs, изготовленных в атмосфере аргона, после облучения нейтронами профиль  $C-V$ -характеристики не изменился, однако емкости слоев уменьшились приблизительно в два раза, степень компенсации донорных примесей глубокими ловушками значительно возросла, эффективная концентрация носителей уменьшилась, а толщина слоя объемного заряда увеличивалась.



Н.А. Фоминых (асп., 3 год, СПбАУ, лаб. нанофотоники),  
М.В. Максимов (д.ф.-м.н., СПбАУ, лаб. нанофотоники)

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ InGaAs/GaAs КВАНТОВЫХ ТОЧКО-ЯМ

В настоящее время усилия многих исследовательских групп направлены на создание быстродействующих фотодетекторов (ФД), работающих в спектральном диапазоне 0.9-1.1 мкм. Лазеры и светоизлучающие диоды этого спектрального диапазона находят широкое применение, например, в биометрии, системах машинного зрения, медицине. В работе [1] для ФД на основе InGaAs/GaAs квантовых ям с максимальной чувствительностью вблизи длины волны 0.97 мкм получена частота отсечки 1.3 ГГц на уровне -3 дБ. Использование в поглощающей области *p-i-n* ФД многослойных рядов InGaAs/GaAs квантовых точек позволило достигнуть длин волн 1.06 мкм [2] и 1.03 мкм [3], информации о динамическом отклике таких приборов нет. Одним из перспективных материалов для создания таких ФД являются InGaAs/GaAs квантовые точко-ямы (КТЯ). Ранее с использованием InGaAs/GaAs КТЯ были реализованы эффективные солнечные элементы [4], лазеры [5,6] и оптопара [7].

В данной работе впервые выполнено исследование частотного отклика *p-i-n* ФД на InGaAs/GaAs КТЯ при малосигнальной модуляции при поглощении в слое InGaAs/GaAs КТЯ (использовалось излучение с длиной волны 905 нм) или в слое GaAs (излучение с длиной волны 860 нм). Исследуемые гетероструктуры получены методом МОС-гидридной эпитаксии. В качестве поглощающей области были использованы 20 слоев InGaAs/GaAs КТЯ. ФД был изготовлен методом сухого травления в геометрии круглой мезы диаметром 36 мкм и высотой 1.5 мкм. Получено максимальное значение полосы пропускания ( $f_{3дБ}$ ) 8.2 ГГц на длине волны 905 нм. С учетом влияния паразитной RC-цепочки эквивалентной электрической схемы получено, что  $f_{3дБ}$  внутреннего отклика ФД составила 12.5 ГГц. Также обнаружено, что внутренний отклик в основном определяется временем дрейфа носителей заряда в области обеднения. Таким образом, получено, что *p-i-n* ФД на основе InGaAs/GaAs КТЯ могут быть использованы в качестве высокоскоростных ФД, работающих в спектральной диапазоне 0.9-1.1 мкм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-12-00287, <https://rscf.ru/project/18-12-00287/>.

1. В.К. Jeong et al. *J. Optoelectron. Adv. Mat.*, **10**, 2547–54 (2008).
2. Х.М. Sun et al. *Electron. Lett.*, **45**, 329–31 (2009).
3. О. Baklenov et al. *Electron. Lett.*, **34**, 694–5 (1998).
4. S.A. Mintairov et al. *Electron. Lett.*, **51**, 1602–4 (2015).
5. Е. Moiseev et al. *Opt. Lett.*, **43**, 4554–7 (2018).
6. F. Zubov et al. *Opt Lett.*, **44**, 5442-5 (2019).
7. N.V. Kryzhanovskaya et al. *Technical Physics Lett.*, **46**, 629-32 (2020).

## III-V ОПТОПАРА НА Si ПОДЛОЖКЕ

Интегрирование компактных источников света и детекторов на основе III-V полупроводниковых соединений на кремний является одной из актуальных задач современной нанофотоники [1]. В качестве компактного источника света может выступить III-V полупроводниковый микродисковый лазер с латеральным выводом излучения, что уменьшает потери на III-V – Si гетероинтерфейсе [2]. Микродисковые лазеры с активной областью на основе InGaAs/GaAs квантовых точек обладают также рядом преимуществ, таких как низкий пороговый ток и низкая чувствительность к безызлучательной рекомбинации, высокие рабочие температуры, а также улучшенная температурная стабильность характеристик [3,4]. В свою очередь использование InGaAs/GaAs квантовых точек в качестве активной области фотодетектора позволяет повысить чувствительность детектора и снизить темновой ток в нем [5,6]. В данной работе была реализована оптопара, состоящая из микродискового лазера диаметром 31 мкм и фотодетектора размером 5 x 200 мкм. Оба оптоэлектронных устройства были размещены на кремниевой пластине путем термокомпрессионной Au-Au пайки, расстояние между фотодетектором и лазером составило 25 мкм.

В работе исследовались вольт-амперные и ватт-амперные характеристики микродискового лазера и фотодетектора, а также фототок детектора в зависимости от тока накачки микролазера и от величины напряжения обратного смещения при температуре 20°C. Получено низкое значение плотности темнового тока фотоприемника, которое составило всего 2,1 мкА/см<sup>2</sup>. Продемонстрировано детектирование излучения микролазера, работающего в непрерывном режиме на длине волны генерации  $\lambda \sim 1.1$  мкм с чувствительностью 0.68 А/Вт при отсутствии напряжения смещения. Получена эффективность оптической связи на уровне 1%. Более высокая эффективность оптической связи может быть достигнута при реализации направленного вывода из микролазера. Исследуемый метод переноса III-V элементов может быть использован и для интеграции на любую другую подложку, включая гибкие.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-12-00287, <https://rscf.ru/project/18-12-00287/>.

1. Z. Zhou et al. *Light Sci. Appl.*, **4**, 358 (2015).
2. A.E. Zhukov et al. *Light Sci. Appl.*, **10**, 80 (2021).
3. Y. Ota et al. *Optics Express*, **25(17)**, 19981 (2017).
4. H. Deng et al. *Adv. Optical Mater.*, **9**, 2100415, (2021).
5. D. Inoue et al. *Appl. Phys. Lett.*, **113(9)**, 093506 (2018).
6. I. Sandall et al. *Optics Express*, **20(10)**, 10446 (2012).

Е.С. Алимova (студ., 4 курс, СПбПУ, ВИФШ),  
И.Б. Захарова (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, ВИФШ),  
М.А. Елистратова (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ТУШЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТЕТРАФЕНИЛПОРФИРИНОВ $H_2TRP$ И $ZnTRP$

Тетрафенилпорфирины – широкозонные органические полупроводники с шириной энергетической щели около 2.8 эВ, обладающие интенсивной фотолюминесценцией в видимой области спектра. Со структурами на основе порфиринов связана перспектива создания органических устройств оптоэлектроники [1]. Фотолюминесценция органических полупроводников является информативным методом изучения электронных спектров полупроводников и композитов. При этом спектры фотолюминесценции могут сильно зависеть от температуры [2]. Такое поведение может быть связано с процессами тушения фотолюминесценции при изменении температуры.

В настоящей работе представлены результаты исследования природы температурного тушения фотолюминесценции тонких пленок на основе тетрафенилпорфиринов. В качестве образцов были использованы тонкие пленки тетрафенилпорфиринов со свободным основанием ( $H_2TRP$ ) и с двухвалентным металлом ( $ZnTRP$ ), полученные методом термического напыления в вакууме (методом модифицированной горячей стенки) на подложках кремния. Исследовано влияние температуры на спектры фотолюминесценции вышеуказанных структур. Показано, что спектры  $ZnTRP$  по своей форме и числу пиков отличаются от  $H_2TRP$ , что связано с наличием ионов металла в структуре макроцикла порфирина. Изучены зависимости интенсивности фотолюминесценции  $H_2TRP$  и  $ZnTRP$  от температуры  $I(T)$  для каждой длины волны, на которой наблюдается пик. Результаты показали, что для  $H_2TRP$  наблюдалось «классическое» монотонное тушение фотолюминесценции с ростом температуры, связанное с процессами колебательной релаксации в возбужденных молекулах. При этом зависимости  $I(T)$  для  $ZnTRP$  имеют необычную немонотонную зависимость. Это может быть связано с тем, что во время охлаждения до 77 К происходит захват носителей заряда на глубокие центры (ловушки). Аномальный рост интенсивности люминесценции при повышении температуры связан с тем, что ранее захваченные носители заряда могут термически возбуждаться и переходить в центры излучательной рекомбинации. При дальнейшем увеличении температуры все захваченные носители делокализуются, и интенсивность люминесценции постепенно начинает снижаться, как в «классической» модели.

1. Janghour M. et al. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, **114**, 2, 445–451 (2014).

2. Nurhayati et al. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. IOP Publishing*, **858**, 1, 012036 (2020).

Е.А. Лубянкина (студ., 6 курс, АУ им. Ж.И. Алферова, каф. физики и технологии наногетероструктур),  
Е.С. Бабич (к.ф.-м.н., м.н.с., АУ им. Ж.И. Алферова, лаб. нанофотоники.),  
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., зав. международной лаб. квантовой оптоэлектроники, АУ им. Ж.И. Алферова),  
А.А. Липовский (д.ф.-м.н., проф., зав. каф. физики и технологии наногетероструктур АУ им. Ж.И. Алферова)

## УПРАВЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЕЙ ДЕНДРИТНЫХ СТРУКТУР, ФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗОМ СТЕКЛА

Биодатчики на основе спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) характеризуются невысокой стоимостью, простым протоколом, высокой чувствительностью и быстройдействием [1]. В основе ГКР спектроскопии - усиление световой волны, рассеянной молекулами, которые адсорбированы на подложку с металлическими наноструктурами. Нами предложен подход к изготовлению ГКР-активных подложек, представляющих собой дендритные структуры, сформированные в матрице стекла. Такая методика не требует использования дорогостоящих оборудования и материалов. Для формирования дендритов использован электролиз обогащенного ионами серебра стекла, протекающий при приложении электрического напряжения к разогретому стеклу посредством тонкопленочных алюминиевых электродов, нанесенных на противоположные поверхности, стекла. Ионы серебра вводились в приповерхностную область стекла посредством серебряно-натриевого ионного обмена. Дендритные структуры формировались в приповерхностном слое стекла, поэтому мы использовали химическое травление в растворе HF для получения дендритов на поверхности. Морфология и структура сформированных дендритов были охарактеризованы с помощью атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии, рентгенодифракционного анализа и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Продемонстрировано, что увеличение заряда, прошедшего в ходе электролиза, и времени химического травления стекла со сформированными дендритными структурами приводят к увеличению фрактальности серебряных структур. Полученные структуры были апробированы с использованием тестового анализатора в спектроскопии ГКР. Обнаружено, что коэффициент усиления КР по меньшей мере на порядок превышает усиление, демонстрируемое аналогичными фрактальными структурами, изготовленными литографическими методами, электролевым структурированием коллоидных растворов и электрохимическим осаждением. Разработанный подход предоставляет возможность массового производства ГКР-подложек большого размера, так как при электролизе дендритные структуры образуются равномерно на всей поверхности стекла.

1. S. Pang et al., *TrAC*, **85**, 73-82 (2016).

А.М. Ромашкина (студ., 2 курс маг., МГУ, каф. квантовой электроники),  
И.А. Колмычек (к.ф.-м.н., доц., МГУ, каф. общей физики),  
Т.В. Мурзина (д.ф.-м.н., доц., МГУ, каф. квантовой электроники)

## УСИЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТНОГО МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУРАХ ОПАЛ/КОБАЛЬТ/СЕРЕБРО

Управление параметрами света за счет его взаимодействия с наноструктурами различного дизайна и метаповерхностями является одним из актуальных направлений современной фотоники. Сочетание в единой структуре плазмонных и магнитных свойств приводит к усилению магнитооптических эффектов, что было продемонстрировано в том числе для разных типов магнитных плазмонных кристаллов, поддерживающих распространение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) - электромагнитных волн, локализованных на границе металла и диэлектрика [1, 2]. В данной работе экспериментально исследованы оптические и магнитооптические эффекты в гетероструктурах опал/кобальт/серебро, представляющих собой пленки искусственного опала толщиной 10–15 монослоев, на поверхность которых методом магнетронного напыления были последовательно нанесены слои ферромагнитного металла (кобальт) и серебра с толщинами 50 нм и 10 нм, соответственно. В результате была сформирована плазмонная магнитная структура с гексагональной дифракционной решеткой, с одновременной реализацией фотоннокристаллических, плазмонных и магнитных свойств. Изучение магнитооптического (МО) отклика гетероструктур проводилось при приложении поперечного насыщающего магнитного поля (геометрия Войгта) напряженностью 1.5 кЭ; мерой МО эффекта являлся магнитный контраст интенсивности прошедшего излучения.

В частотно-угловых спектрах обнаружено усиление пропускания (аномальное пропускание превышает 110% [3]) и отражения в области возбуждения высокодобротных резонансов ППП. При р-поляризации падающего света в области плазмонного резонанса наблюдается смена знака МО эффекта, возникающая вследствие магнитоиндуцированного сдвига плазмонного резонанса. При этом магнитный контраст достигает 0.65%, что вдвое больше, чем в аналогичных структурах без добавления серебра, что объясняется значительным повышением добротности резонанса. Для s-поляризованного падающего света в области ППП резонанса МО эффект достигает минимума. Полученные результаты позволяют рассматривать изучаемые структуры как перспективные материалы нанофотоники, способные управлять параметрами электромагнитного излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант # 19-72-20103, с использованием оборудования ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур”.

1. A. V. Zayats et al., *Phys. Rep.* **408**, 131 (2005).
2. N. Maccaferri et al., *J. Appl. Phys.*, **127**, 080903 (2020).
3. T. Ebbesen et al., *Nature*, **391**, 667–669 (1998).

Е.В. Кулебякина (асп., 3 год, ФИАН),  
М.Л. Скориков (н.с., ФИАН),  
Е.В. Колобкова (д.х.н., проф., Университет ИТМО, СПбГТУ),  
В.В. Белых (к.ф.-м.н., с.н.с., ФИАН)

### ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ CsPbCl<sub>3</sub>/ Br<sub>3</sub>

Перовскиты, перспективный класс материалов для энергетики, был открыт более ста лет назад. Однако активное исследование перовскитов началось около десяти лет назад, когда были открыты его превосходные оптоэлектронные свойства, такие как большой коэффициент поглощения света, высокая подвижность носителей, большая длина диффузии и т.д. Эти исследования открыли хорошие перспективы для применения перовскитов в солнечных элементах, фотоприемниках, детекторах излучения высокой энергии и других областях.

Галогенидные перовскиты проявляют более высокую термическую стабильность по сравнению с органически-неорганическими гибридными перовскитами, что делает их более привлекательными материалами для исследований. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование спектрально-люминесцентных и кинетических свойств нанокристаллов перовскитов в стекле CsPbX<sub>3</sub>, где X = Cl, Br. Большая часть измерений проводилась при низких температурах в диапазоне от 6 до 35 К. Образцы помещались в гелиевый оптический криостат с температурным контролем. Возбуждение образца осуществлялось пикосекундными импульсами титан-сапфирового лазера. Динамика фотолюминесценции демонстрирует ярко выраженные быструю и медленную компоненту. Увеличение температуры приводит к тому, что вклад медленной компоненты увеличивается, при этом время ее затухания становится меньше. Следовательно, можно говорить о существовании темнового экситона как основного состояния в данной системе.

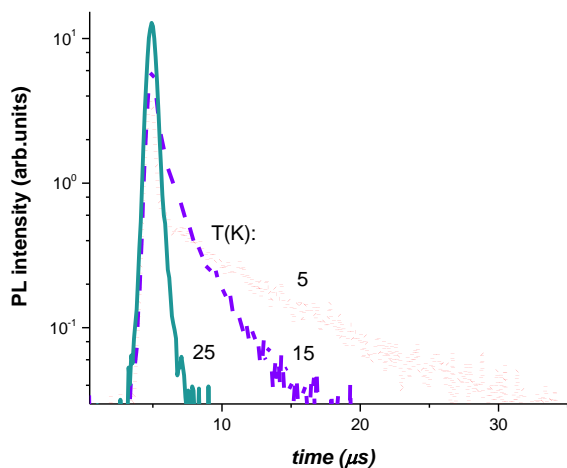


Рис. 1. Температурная зависимость динамики фотолюминесценции нанокристаллов перовскитов в стекле CsPbCl<sub>3</sub>(Br).

Д.И. Маркина (асп., 4 год, Университет ИТМО),  
Д. Хмелевская, П.А. Тонкаев, М.А. Машарин (Университет ИТМО),  
А.П. Пушкарев (к.х.н, с.н.с., Университет ИТМО),  
С.В. Макаров (д.ф.-м.н., г.н.с., Университет ИТМО)

## ДИНАМИКА ЭКСИТОНОВ И СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СВИНЦОВО-ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТАХ ПРИ МНОГОФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Свинцово-галогенидные перовскиты широко известны как экситонные материалы, однако, соотношение экситонов и свободных носителей в них сильно зависит от концентрации носителей заряда, температуры и борновского радиуса экситона [1]. Конкуренция вкладов экситонов и свободных носителей во многом определяет характер различных фотофизических процессов. Так, например, было доказано, что вклад свободных носителей доминирует в солнечных элементах [2], а экситонов - в светоизлучающих устройствах [3]. Однако, когда концентрация носителей становится высокой в таких процессах как лазерная генерация [4] и нелинейное преобразование с повышением частоты [5], выявление доминирующего механизма становится многофакторной задачей, актуальной для современной нанофотоники.

В данной работе мы представляем результаты комплексного исследования линейной и нелинейной фотолюминесценции (ФЛ) в перовскитах состава CsPbBr<sub>3</sub> в зависимости от энергии падающего возбуждения, температуры и размера перовскитной структуры. Показано, что зависимость квантового выхода ФЛ от длины волны падающего излучения демонстрирует выраженные переходы между разными порядками нелинейности и выявляет спектральные диапазоны, в которых порядок нелинейности не равен количеству фотонов, необходимых для межзонного поглощения. В свою очередь, в диапазоне температур от 300 К до 6 К зависимость ФЛ от интенсивности падающего излучения показывает уменьшение порядка нелинейности, что соответствует экситонному отлику. Аналогичный эффект наблюдается для случая уменьшения размера перовскита от поликристаллической пленки толщиной 70 нм до нанокристаллов (НК) размером 10 нм. Полученные результаты полезны для нелинейной нанофотоники: мы показали, что CsPbBr<sub>3</sub> НК, инкапсулированные в резонансные CaCO<sub>3</sub> микросферы, демонстрируют двукратно усиленную двухфотонную ФЛ, что согласуется с квадратичной зависимостью сигнала ФЛ от интенсивности падающего света для НК.

Работа выполнена при финансировании Стипендией Президента молодым ученым и аспирантам (СП-5169.2021.5).

1. Stranks, S.D, et.al. (2014) Physical Review Applied, 2(3), 034007.
2. Green, M.A, et.al. (2014) Nature photonics, 8(7), 506-514.
3. Kim, Y.H., et.al. (2016) PNAS, 113(42), 11694-11702.
4. D. Yang, et.al. (2018) Optical Letters, 43, 2066.
5. Zhu, X., et.al. (2019) Advanced Materials, 31(49), 1901240.

А.О. Мурзин (асп., 1 год, СПбГУ, каф. фотоники),  
 Н.И. Селиванов (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, каф. фотоники),  
 А.В. Емелин (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, каф. фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., ст. преп., СПбГУ, каф. фотоники)

## СПЕКТРОСКОПИЯ ДИФFUЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ: НОВЫЕ МЕТОДЫ И РЕШЕНИЯ

В данной работе предлагается новый метод получения истинных спектров поглощения порошковых образцов на основе спектров диффузного отражения чистых и разбавленных образцов с непоглощающим материалом (поглощение  $\text{BaSO}_4$  принято равным 0). В качестве исследуемых образцов были выбраны измельченные монокристаллы галогенидных перовскитов, таких как  $\text{MAPbI}_3$ ,  $\text{MAPbBr}_3$ ,  $\text{MAPbVBr}_3$ , легированных висмутом, а также одномерный перовскит  $\text{PbPbI}_3$ .

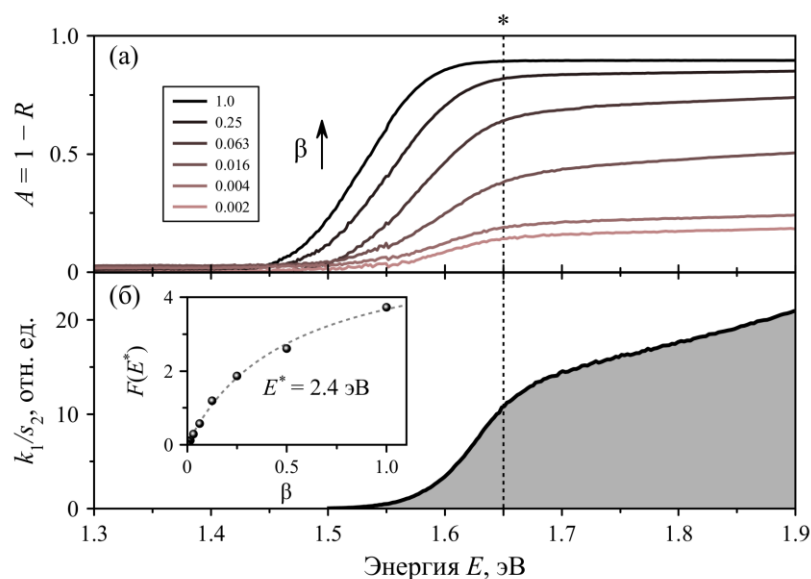


Рис. 1. (а) Поглощение ( $A$ ), полученное из спектров диффузного отражения ( $R$ )  $\text{MAPbI}_3$  при разбавлении  $\text{BaSO}_4$  ( $\beta$  - концентрация  $\text{MAPbI}_3$ ); вставка (б) аппроксимация зависимости функции Кубелки-Мунка  $F(E^*)$  от  $\beta$  для энергии  $E^*$ , отмеченной знаком \*; (б) истинный спектр поглощения, полученный при обработке данных.

При разбавлении становится видимой истинная структура спектров диффузного отражения (рис. 1. (а)), в противном случае скрытая за сильным поглощением материала. Дальнейшая обработка (вставка рис. 1. (б)), основанная на преобразовании Кубелки-Мунка, позволяет получить истинные спектры поглощения (рис. 1 (б)), согласующиеся с литературными [1].

Работа выполнена на оборудовании РЦ "Нанопотоника" СПбГУ при поддержке гранта РНФ 19-72-10034.

1. I. Suárez et al., APL Materials, **7**, 041106 (2019).



ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА ГРАФЕНА В РАСТВОРЕ ПЕРОВСКИТА НА  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Оксид графена (GO) представляет собой новый класс наноматериалов, широко применяющийся в фотоэлектрических устройствах из-за уникальных оптических и электронных свойств. К преимущественным особенностям GO можно отнести отличную стабильность, высокий уровень диспергирования во многих распространенных растворителях, а также дешевые процессы получения вещества [1]. Пленки GO используются в качестве прозрачного р-контактного электрода [2] и для получения композитного слоя Per:GO [3], потому что GO может одновременно быть эффективным слоем для экстракции дырок и эффективным акцептором дырок в гибридных композитах. При изменении % соотношения GO в растворах металлоорганических перовскитов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  и  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  было обнаружено улучшение фотоэлектрических характеристик слоев с последующим ухудшением фотовольтаического отклика при большей концентрации GO с резким изменением проводимости. Улучшенные фотоэлектрические характеристики гибридных композитных пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$  и  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3:\text{GO}$  можно объяснить модификацией гетеропереходов с увеличенными границами раздела внутри активного слоя, которые обеспечивают эффективное разделение зарядов. Дальнейшее увеличение концентрации GO приводит к менее эффективному диспергированию GO в растворах, что негативно сказывается на фотовольтаических характеристиках. Оптимальным является 3% раствор  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$  и 2.5% раствор  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3:\text{GO}$ .

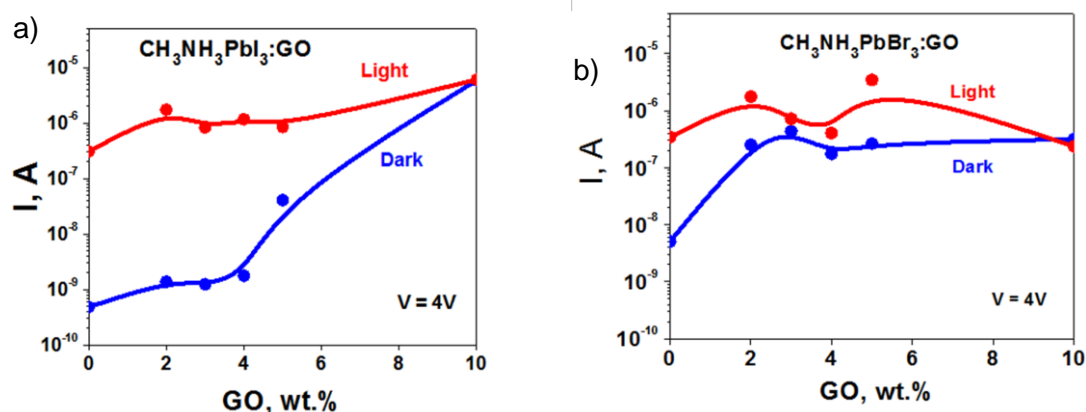


Рис. 1. Эффект освещения имитатором солнечного света композитных пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$  (a) и  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3:\text{GO}$  (b) с разной концентрацией частиц GO.

1. F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan and A. C. Ferrari, Nat. Photonics, 4 (2010) 611–622
  2. S.K. Pradhan, B. Xiao, S. Mishra, et al., *Scient. Rep* | 6:26763 | DOI: 10.1038/srep26763
- A.V. Arkhipov, G.V. Nenashev, A.N. Aleshin, Physics of the Solid State, 63(4) (2021) 661–665.

УСИЛЕНИЕ МНОГОФОТОННОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ  
НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА

Многофотонное поглощение и люминесценция являются принципиально важными нелинейными процессами для использования эффективного взаимодействия света с веществом. В последние десятилетия многофотонные процессы нашли своё применение в создании оптической памяти [1], вынужденном рассеянии [2], микроскопии [3] и нанофабрикации [4]. Несмотря на быстрый прогресс в этом направлении исследований, более широкие применения многофотонных процессов в оптике сильно ограничены из-за их общей низкой эффективности. В последнее время было разработано несколько подходов для усиления многофотонной люминесценции, например, с помощью плазмонных наночастиц с резонансами или с помощью экситонных состояний более высокого порядка. Однако требуемая плотность возбуждающего излучения намного превышает ее линейный аналог в большинстве наноструктур, что значительно затрудняет развитие многих приложений многофотонной нелинейной нанофотоники. Вопрос о возможности какого-либо нелинейного многофотонного процесса, сравнимого с линейным или даже превосходящего его для данного материала, остаётся открытым.

Для решения вышеуказанных проблем в нашей работе применяется несколько подходов. Во-первых, резонансная наноструктура должна быть оптимизирована для усиления локального электромагнитного поля и перекрытия моды. Во-вторых, выбранные материалы должны обладать сильным нелинейным откликом. За последние несколько лет, было исследовано много типов нелинейных материалов, среди которых перовскиты галогенида свинца ( $\text{MAPbX}_3$ ,  $X = \text{Cl, Br, I}$ ) показали свои явные преимущества [5]. Высокий показатель преломления этих материалов обеспечивает локализацию света, в то время как исключительная нелинейная восприимчивость обеспечивает эффективность нелинейных процессов.

В своей работе, объединив преимущества перовскитов с концепцией метаматериалов, мы показываем гигантское усиление двухфотонной фотолюминесценции метаповерхностей перовскита  $\text{MAPbBr}_3$ , сравнимой с однофотонным процессом. Более того демонстрируется порог двухфотонного вынужденного излучения всего в 2.7 раза превосходящий линейный случай.

1. С.Е. Olson et al., *Nat. Mater.*, **1**, 225–228 (2002).
2. А.А. Traverso et al., *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 063602 (2018).
3. В.В. Li et al., *Nat. Methods*, **17**, 163–166 (2020).
4. Q. Geng et al., *Nat. Commun.*, **10**, 2179 (2019).
5. S.V. Makarov et al., *ACS Photonics*, **4**, 728–735 (2017).

Д.Н. Тонков (асп., 1 год, СПбПУ, ВИФШ),  
М.И. Кобыляцкая (асп., 1 год, СПбПУ, каф. ОХ),  
Е.С. Васильева (доц., СПбПУ, ВШФиТМ),  
А.В. Семенча (директор ВШФиТМ, СПбПУ, ВШФиТМ),  
В.Э. Гасумянц (проф., СПбПУ, ВИФШ)

## ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ГИБКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР

Введение в полимерные материалы различных проводящих наполнителей позволяет изменять в широких пределах как проводящие, так и другие практически важные свойства образующихся композитов, что позволяет использовать их в различных областях электроники: от OLED диодов до датчиков движения, деформации и контроля здоровья. В настоящее время наибольший интерес вызывает использование в качестве наполнителя различных углеродных материалов, таких как углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерены, графен, графит [1]. При этом свойства композита могут существенно зависеть не только от концентрации, но и от формы частиц наполнителя.

В данной работе были исследованы зависимости сопротивления  $\rho$  композитов на основе полимера SBR (бутадиен-стирольный каучук) с наночастицами графена, графита и углеродными нанотрубками в качестве наполнителя от концентрации наполнителей  $x$ , а также чувствительность сопротивления композитов к одноосному растяжению. Из анализа зависимостей  $\rho(x)$  в диапазонах концентраций наполнителей, соответствующих реализации прыжкового механизма проводимости, в рамках моделей, рассматривающих различную размерность частиц наполнителя, показано, что во всех трех исследованных случаях (включая двумерный графен) в композите образуются трехмерные проводящие кластеры наполнителя. Также были определены пороги перколяции, составившие 0.1, 12 и 16.5 мас. % для композитов с УНТ, графеном и графитом. Различия между этими значениями связаны с отношением размеров проводящих и непроводящих кластеров в композите [2].

Также была исследована чувствительность сопротивления композитов к растяжению. Значения фактора деформации (отношения изменения сопротивления образца к изменению его длины) для композитов с УНТ не превышало 40, в то время как при содержании графита и графена, равном 23 мас.%, оно составило 1005 и 2660, соответственно. В результате были получены образцы с оптимальной концентрацией наполнителя с точек зрения как проводящих свойств, так и чувствительности сопротивления к растяжению, которые в дальнейшем планируется использовать для разработки датчиков деформации.

1. T. Kuilla, S. Bhadra, D. Yao, N.H. Kim, S. Bose, J.H. Lee. *Prog. Polym. Sci.* **35**, 1350-1375 (2010).

2. Da He, N.N. Ekere, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, 1848-1852 (2004).

С.А. Хахулин (асп., 1 курс, СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
О.С. Комков (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ, каф. МНЭ)

## АНИЗОТРОПНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ГРАФЕНОПОДОБНЫХ КРИСТАЛЛОВ GaSe, ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ТЕТРАСЛОЁВ НА $E_0$

Моноселенид галлия — слоистый полупроводниковый материал, на основе нескольких тетраслоёв (Se-Ga-Ga-Se) которого созданы прототипы сверхвысокочувствительных фотоприёмников с чувствительностью  $\sim 1000$  А/Вт при  $\lambda = 410$  нм при плотности мощности облучения  $0,01$  мВт/см<sup>2</sup> [1]. Теоретически предсказано, что ширина запрещённой зоны GaSe зависит от числа составляющих его тетраслоёв (ТС). Согласно расчётам [2], уменьшение толщины GaSe до 2 ТС приводит к увеличению  $E_0$  на  $0,7$  эВ, однако существующие экспериментальные данные отличаются друг от друга и не соответствуют теории.

Наиболее эффективно исследовать параметры зонной структуры полупроводниковых кристаллов можно при помощи методов модуляционной оптической спектроскопии. В представленной работе была использована спектроскопия анизотропного отражения (АО), где модуляция осуществляется за счёт вращения направления линейной поляризации зондового излучения в плоскости поверхности исследуемых образцов. В результате данный метод обладает высокой чувствительностью, благодаря чему можно регистрировать отклик от нескольких слоёв изучаемых материалов и исследовать оптические свойства 2D структур [3].

Наблюдаемый нами ряд сигналов АО объёмного GaSe (производство 2D Semiconductors) соотносится с известными значениями энергии оптических переходов  $E_0 = 2$  эВ — прямой межзонный переход, и  $E_I = 3,53$  эВ — положение критической точки  $M$  зонной структуры. В случае эпитаксиального образца GaSe толщиной  $126$  нм, выращенного методом МПЭ на подложке GaAs(111), измеренный спектр оказался сдвинут в область больших значений энергии (пик в области  $2,2$  эВ) по сравнению с объёмным кристаллом. Полученный сигнал АО аналогичного эпитаксиального образца GaSe толщиной 2 ТС ( $1,6$  нм) с максимумом при  $2,5$  эВ был соотнесён с откликом образца в районе критической точки  $E_0$  (другими оптическими методами спектроскопии, в частности методом фотолюминесценции при  $T = 10$  К, зарегистрировать сигнал от данного образца не удалось). Полученный результат может свидетельствовать об увеличении ширины запрещённой зоны GaSe при переходе от объёмного образца с  $E_0 = 2$  эВ к двумерным кристаллам.

Авторы выражают благодарность Сорокину С.В. и Авдиенко П.С. за рост эпитаксиальных образцов GaSe, а также Берковицу В.Л. за помощь в измерении спектров АО.

1. Y. Cao, et al. Sci. Rep. **5**, 8130 (2015).
2. X. Li, et al. Sci. Rep. **4**(1), 1 (2014).
3. O. Ruiz-Cigarrillo, et al. Phys. Rev. B **103**(3), 035309 (2021).

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

	<i>№ доклада</i>	<i>Стр.</i>			
Адамов Р.Б.	ГСКЯ-1	54	Иванова Т.В.	ГСКЯ-2	41
Аверина Н.И.	У-21	5	Ивкин М.М.	ПР-8	25
Алимова Е.С.	НМ-1	98	Илюхина А.А.	ОСП-4	10
Алтынбаев Л.А.	У-33	38	Кабаев К.С.	ОСП-5	11
Андреева А.С.	У-8	87	Кадинская С.А.	ПР-9	32
Андрианов А.И.	ПР-1	22	Калентьева И.Л.	ПОиН-3	93
Аубекеров К.	КТКН-1	67	Караборчев А.А.	У-24	42
Баранов А.И.	ПР-2	27	Козлов В.О.	У-22	12
Батаев М.Н.	У-2	55	Колосовский Д.А.	ПР-10	33
Блеян Ю.Ю.	КТКН-2	76	Колпаков М.А.	У-39	89
Богомоллов Д.Б.	ПР-3	23	Кондрашов И.И.	ПР-11	34
Бойко Е.В.	ПР-4	28	Конюх Д.А.	У-36	18
Бондаренко Д.Н.	У-11	77	Костромин Н.А.	ГСКЯ-3	43
Бурмистров Е.Р.	У-48	39	Краснова И.А.	ПР-13	26
Бутаев М.Р.	У-45	56	Кузнецов А.	У-10	68
Бутюгина А.А.	У-4	37	Кузнецов Н.С.	У-23	44
Быков В.А.	ОСП-1	6	Кузнецов Ю.М.	ПР-12	35
Ведь М.В.	У-16	57	Кузнецова Я.А.	КТКН-5	69
Вейшторг И.П.	ОСП-2	7	Кулебякина Е.В.	У-29	101
Ветчинников М.П.	КТКН-3	78	Лазаренко А.А.	ПОиН-4	94
Вершовский А.К.	ПД-1	3	Лебедева Н.М.	ПОиН-5	95
Гаврилов М.С.	У-13	29	Лемешко П.С.	КТКН-6	70
Глазов М.М.	ПД-2	4	Лихачев К.В.	У-17	71
Голтаев А.С.	У-9	79	Лубянкина Е.А.	НМ-2	99
Граф С.В.	У-34	58	Маркина Д.И.	У-31	102
Дмитриев А.А.	КТКН-4	80	Масталиева В.А.	У-7	81
Драгунова А.С.	У-42	97	Махмудиан М.М.	У-37	45
Жихарев П.В.	ПР-5	24	Мельниченко И.А.	КТКН-7	66
Загитова А.А.	У-19	59	Миронов С.А.	ОСП-6	19
Захаров А.А.	ПОиН-1	88	Митряхин В.Н.	У-35	64
Захаров В.Е.	ОСП-3	8	Михайлов П.О.	У-12	90
Захарченко М.В.	У-40	17	Михин А.О.	ГСКЯ-4	65
Зо Хтет Аунг	ПР-6	30	Мкртчян М.А.	КТКН-8	82
Золотухин Д.С.	ПР-7	31	Моисеенко И.М.	У-49	60
Зубанов И.А.	У-18	9	Мурзин А.О.	У-32	103
Иванов А.А.	У-50	40	Назаров Р.С.	У-5	46
			Ненашев Г.В.	НМ-4	104

Николаев И.Д.	У-27	47	Фоминых Н.А.	У-44	96
Перетокин А.В.	У-41	72	Хахулин С.А.	У-25	107
Попов А.А.	ПОиН-7	91	Хачатрян А.Ш.	У-14	20
Разова А.А.	У-46	48	Хачатрян Х.С.	КТКН-10	85
Ромашкина А.М.	НМ-3	100	Хомич А.А.	ОСП-9	21
Ростовцев Н.Д.	У-6	73	Хорошилов В.С.	ПР-14	36
Рудоминский А.Е.	ОСП-7	13	Чукеев М.А.	У-3	61
Трошкин А.О.	У-43	51			
Рябова М.А.	ПОиН-8	92	Шапран Д.А.	У-38	62
Савченко С.С.	У-26	83	Шарипова М.М.	У-1	63
Саргсян Т.А.	КТКН-9	84	Шидаков Г.С.	ГСКЯ-5	52
Скоморохов А.М.	У-20	49	Шилов А.О.	КТКН-11	86
Смирнова В.А.	У-51	50	Шугабаев Т.М.	КТКН-12	75
Такаева А.А.	У-28	74	Яковлев З.А.	У-47	53
Тонкаев П.А.	У-30	105	Яковлева А.А.	У-15	15
Тонков Д.Н.	НМ-5	106	Яковлева В.В.	ОСП-10	16
Трофимов М.С.	ОСП-8	14			

## ОРГАНИЗАТОРЫ И СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

### Организаторы конференции

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Академический университет им. Ж.И. Алферова  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Российско-армянский университет

### Финансовая поддержка

Госзадание Минобрнауки РФ №075-03-2021-050/5  
ООО «Тидекс»

### Программный комитет

*Председатель* — Р.А. Сурис, акад. РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН  
*Заместитель председателя* – Д.А. Фирсов, СПбПУ, С.-Петербург

### Члены комитета:

В.Ф. Агекян, СПбГУ, С.-Петербург	М.С. Каган, ИРЭ им. В.А. Котельникова
И.А. Акимов, Технический университет Дортмунда, Германия	РАН Москва
В.Я. Алешкин, ИФМ РАН, Н. Новгород	В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
С.Ю. Вербин, СПбГУ, С.-Петербург	И.В. Рожанский, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
М.М. Глазов, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург	А.А. Саркисян, Российско-армянский университет, Ереван, Армения
А.В. Двуреченский, ИФП СО РАН, Новосибирск	Д.Р. Хохлов, МГУ, Москва
А.Е. Жуков, Академический университет им. Ж.И. Алферова, С.-Петербург	Т.В. Шубина, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
В.И. Зубков, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С.-Петербург	

### Организационный комитет

Председатель – Д.А. Фирсов, СПбПУ, С.-Петербург  
Заместитель председателя – Л.Е. Воробьев, СПбПУ, С.-Петербург  
Ученый секретарь – М.Д. Молдавская, СПбПУ, С.-Петербург

### Члены оргкомитета:

Е.В. Владимирская, СПбПУ, С.-Петербург	Г.А. Мелентьев, СПбПУ, С.-Петербург
М.Я. Винниченко, СПбПУ, С.-Петербург	С.Ф. Мусихин, СПбПУ, С.-Петербург
Т.А. Гаврикова, СПбПУ, С.-Петербург	В.Ю. Паневин, СПбПУ, С.-Петербург
В.Э. Гасумянц, СПбПУ, С.-Петербург	А.Д. Петрук, СПбПУ, С.-Петербург
А.Е. Жуков, Академический университет им. Ж.И. Алферова, С.-Петербург	А.А. Саркисян, РАУ, Ереван, Армения
В.А. Зыков, СПбПУ, С.-Петербург	Н.Ю. Харин, СПбПУ, С.-Петербург
В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург	В.А. Шальгин, СПбПУ, С.-Петербург
И.С. Махов, СПбПУ, С.-Петербург	И.И. Щипачева, СПбПУ, С.-Петербург

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)	3
ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)	5
ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)	22
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)	37
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)	66
ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)	87
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ (НМ)	98
Авторский указатель	108
ОРГАНИЗАТОРЫ И СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ	110



**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
И НАНОСТРУКТУР,  
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ  
ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

Тезисы докладов Всероссийской  
научной молодежной конференции

22–26 ноября 2021 года

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

---

Подписано в печать 03.12.2021. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 7,0. Тираж 100. Заказ 4897.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета,  
предоставленного оргкомитетом конференции,  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.



# ТИДЕКС

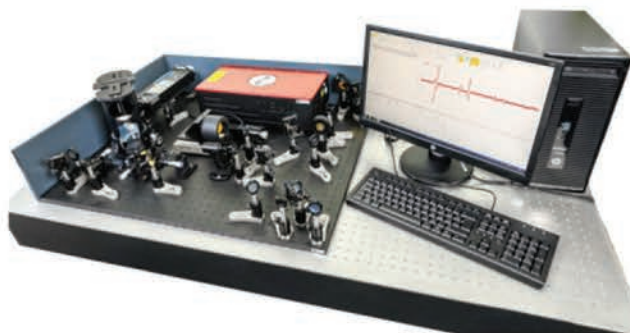
ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

## ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИТС-1

является комплексным решением для задач, связанных с применением широкополосной терагерцовой (ТГц) спектроскопии во временной области.

ИТС-1 идеально подходит для научных исследований благодаря распространению излучения в свободном пространстве и обладанию достаточно гибкой оптической схемой. Удобство регулярных измерений обеспечивается многофункциональным ПО, поставляемым вместе с системой. Также в комплект поставки ИТС-1 входит твердотельный фемтосекундный лазер, электрооптический детектор импульсного ТГц излучения, все оптомеханические компоненты для оптического и ТГц пути, линия задержки,

управляющие электронные блоки оптической линии задержки, оптико-механического модулятора и лазера.



### Основные параметры:

- спектральный диапазон: 0.1 – 2.5 ТГц (0.12 – 3 мм; 3.3 – 83.3 см<sup>-1</sup>);
- динамический диапазон: не менее 60 дБ;
- средняя мощность излучения: ~ 300 мкВт;
- максимальная временная задержка: 330 пс;
- спектральное разрешение: не менее 5 ГГц.



### Применение

Системы импульсной ТГц спектроскопии могут применяться для решения различных задач, таких как:

- клеточный анализ и диагностика мягких тканей в медицине и биологии;
- определение толщины лакокрасочных покрытий для нужд автомобильной промышленности;
- исследования слоистой структуры и спектральный анализ объектов культурного наследия;
- определение наличия и концентрации примесей и присадок в сырой нефти и различных видах топлива;
- измерение основных параметров материалов: показателя преломления, коэффициента поглощения, действительной мнимой части диэлектрической проницаемости;
- исследование процесса транспорта (переноса) электронов и магнетизма в сложных материалах;
- определение концентрации легирующей примеси в полупроводниках;
- исследования в области новых электронных и магнитных материалов (например, в топологических изоляторах, графене, функциональных сложных оксидах);
- изучение свойств тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (например, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO));
- определение циклотронных резонансов полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда;
- исследования в области плазмоники и спинтроники.

Для облегчения процесса измерений образцов на ИТС-1 ООО «ТИДЕКС» предлагает кюветы для сыпучих материалов, жидкостей или газов. Стандартный материал окон кюветы – полиметилпентен (TPX); корпуса - нержавеющая сталь. Также возможно изготовление кювет по спецификации заказчика.

**Система менеджмента качества, распространяющаяся на производство и реализацию продукции компании, сертифицирована по GOST R ISO 9001-2015 (ISO 9001:2015).**

ООО «ТИДЕКС», 194292 Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16.

Тел: (812) 334-67-01, (812) 331-87-02 Факс: (812) 309-29-58

E-mail: [optics@tydex.ru](mailto:optics@tydex.ru)

[www.tydex.ru](http://www.tydex.ru)



# ТИДЕКС

НАУЧНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ОПТИКА

**ОПТИКА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ, FTIR И ТЕСТИРОВАНИЯ:** внеосевые параболические зеркала, делители-компенсаторы для FTIR, плоские и сферические зеркала, окна, призмы, голографические notch-фильтры, ИК-поляризаторы, ATR-элементы

**ОПТИКА ДЛЯ ПИРОМЕТРИИ И ТЕРМОГРАФИИ:** фронтальная оптика для тепловизионных ИК-систем: сферические и асферические линзы из Si, Ge (включая EMI-grade), ZnSe и ZnS, защитные стекла, обтекатели, иллюминаторы, ИК защитные окна для дронов



**ПРИБОРЫ И ОПТИКА ДЛЯ ТГц:** импульсный терагерцовый спектрометр, детекторы Голея, ТГц расширители пучка, электрооптический детектор для TDS, сканирующий интерферометр Фабри-Перо, эталон Фабри-Перо, синхронный усилитель, объективы, отрезающие и полосовые фильтры, поляризаторы, аттенюаторы, окна, линзы, призмы, зеркала, волновые пластинки, перестраиваемые преобразователи поляризации, широкополосные фазовые преобразователи, спектроделители, лучеделители

**ОПТИКА ДЛЯ СЕНСОРОВ И ДЕТЕКТОРОВ:** компоненты для высокотемпературных сенсоров, пиранометров, пиргеометров, для C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-, NH<sub>3</sub>-, CO<sub>2</sub>-, CO- и CH<sub>4</sub>-детекторов

**ОПТИКА ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ И КЛИМАТОЛОГИИ:** защитные колпаки для пиранометров, фильтры для пиргеометров, кварцевые рассеиватели, защитные колпаки с фильтрующим покрытием (фильтры нейтральной плотности)

**ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ:** просветляющие, диэлектрические отражающие, металлические, комбинированные, ИК-солнцезащитные, алмазоподобные, токопроводящие, ТГц просветляющие покрытия

**ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:** Ge, Si (включая HRFZ-Si), ZnS, ZnSe, CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, сапфир (оптический и профилированный), LiNbO<sub>3</sub>, CdSe, KBr, NaCl, KCl, плавный и кристаллический кварц, стекло, ситалл, TPX, ZEONEX

## ЗАЩИТНАЯ ФРОНТАЛЬНАЯ ОПТИКА ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ:

Системы раннего обнаружения, дневного и ночного наблюдения, контроля пространства, слежения, прицеливания, удержания и сопровождения объектов широко используют ИК оптику.

Специальные области применения диктуют повышенные требования к оптическим материалам и покрытиям, которые для фронтального элемента оптической системы воспринимают суровые эксплуатационные нагрузки.

Любая система для данного применения должна не только однозначно различать и хорошо «видеть» объект/цель, но также и сводить к минимуму возможность собственного обнаружения.

С учетом вышеперечисленных требований «ТИДЕКС» производит:

- Защитные окна для прицелов и тепловизоров, работающих в диапазоне 3-5 мкм и 7-14 мкм;
- Менисковые линзы для тепловизионных систем наведения, ориентирования в пространстве, слежения и сопровождения движущихся объектов;
- Оптические окна-пленки прозрачные в диапазонах 3-5 мкм и 7-14 мкм для БПЛА.



**Система менеджмента качества, распространяющаяся на производство и реализацию продукции компании, сертифицирована по GOST R ISO 9001-2015 (ISO 9001:2015).**

Информацию о продукции можно получить на вебсайте компании: [www.tydex.ru](http://www.tydex.ru).

ООО «ТИДЕКС», 194292 Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16.

Тел: (812) 334-67-01, (812) 331-87-02 Факс: (812) 309-29-58

E-mail: [optics@tydex.ru](mailto:optics@tydex.ru)