

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

25–29 ноября 2024 года

Санкт-Петербург



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2024

ББК 22.379
Ф48

Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника : тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции, 25–29 ноября 2024 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 103 с.

ISBN 978-5-7422-8770-4

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Госзадание Минобрнауки РФ №075-03-2024-004/5)
ООО «Тидекс»

Программный комитет

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

Члены комитета:

В.Ф. Агекян, СПбГУ, С.-Петербург	М.С. Каган, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
И.А. Акимов, Технический университет Дортмунда, Германия	О.С. Комков, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", С.-Петербург
В.Я. Алешкин, ИФМ РАН, Н. Новгород	В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
С.Ю. Вербин, СПбГУ, С.-Петербург	А.А. Саркисян, Российско-армянский университет, Ереван, Армения
М.М. Глазов, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург	Д.Р. Хохлов, МГУ, Москва
А.Е. Жуков, НИУ ВШЭ, 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 – М.Я. Винниченко, СПбПУ, С.-Петербург
Ученый секретарь – Н.Ю. Харин, СПбПУ, С.-Петербург

Члены организационного комитета:

Е.В. Владимирская, СПбПУ, С.-Петербург	И.С. Мухин, Алфёровский университет, С.-Петербург
Т.А. Гаврикова, СПбПУ, С.-Петербург	И.А. Норватов, СПбПУ, С.-Петербург
В.Э. Гасумянц, СПбПУ, С.-Петербург	В.Ю. Паневин, СПбПУ, С.-Петербург
В.А. Зыков, СПбПУ, С.-Петербург	А.А. Саркисян, РАУ, Ереван, Армения
Д.А. Караулов, СПбПУ, С.-Петербург	Р.В. Устименко, СПбПУ, С.-Петербург
В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург	В.А. Шалыгин, СПбПУ, С.-Петербург
Г.А. Мелентьев, СПбПУ, С.-Петербург	И.И. Щипачева, СПбПУ, С.-Петербург

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)	5
ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)	7
ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)	21
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)	33
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)	54
ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)	70
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ (НМ)	97
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	101

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)

УДК 535.3

М.В. Дурнев (с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ДВУМЕРНЫХ СИСТЕМАХ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРИРОВАННЫМ СВЕТОМ

Современные экспериментальные методы позволяют создавать пучки структурированного электромагнитного излучения с контролируемым пространственным распределением интенсивности, поляризации и фазы [1]. Примерами такого структурированного света являются пучки закрученных фотонов, обладающих орбитальным угловым моментом [2], и «векторные» пучки с меняющейся в пространстве поляризацией [3]. Особый интерес представляют исследования взаимодействия структурированного излучения с веществом, в том числе, с атомами, наночастицами и кристаллическими средами [4, 5, 6]. Так, в недавних экспериментальных работах [7, 8] обнаружены фототоки в двумерных средах, чувствительные к угловому моменту излучения и пространственной структуре поляризации.

В докладе будут представлены результаты исследований фотоотклика двумерных систем на структурированное электромагнитное излучение. Будет показано, что взаимодействие излучения с пространственно неоднородными параметрами с двумерными электронами приводит к появлению направленных электрических токов и генерации второй гармоники [9, 10]. Будут обсуждаться механизмы фотоотклика при поглощении электромагнитного излучения различных спектральных диапазонов, в частности, механизмы, обусловленные градиентами поляризационных параметров Стокса и фазы электромагнитного поля. Будет показано, что пучки закрученного света приводят к генерации вихревых токов, направление и величина которых контролируются угловым моментом фотонов, а также будут рассмотрены возможные эксперименты по детектированию этих фототоков. Будет показано, что пространственная структура излучения приводит к генерации второй гармоники даже в однородных и изотропных двумерных средах.

1. A. Forbes, M. de Oliveira, and M. R. Dennis, *Nat. Photonics* **15**, 253 (2021).
2. Б. А. Князев, В. Г. Сербо, *Усп. физ. наук* **188**, 508 (2018).
3. C. Maurer et al., *New J. Phys.* **9**, 78 (2007).
4. C. T. Schmiegelow et al., *Nature Commun.* **7**, 12998 (2016).
5. Y. Yang, Y. Ren, M. Chen, Y. Arita, and C. Rosales-Guzmán, *Adv. Photonics* **3**, 034001 (2021).
6. A. A. Sirenko et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 237401 (2019).
7. Z. Ji et al., *Science* **368**, 763 (2020).
8. S. Sederberg et al., *Nat. Photon.* **14**, 680 (2020).
9. A. A. Gunyaga, M. V. Durnev, and S. A. Tarasenko, *Phys. Rev. B* **108**, 115402 (2023).
10. A. A. Gunyaga, M. V. Durnev, and S. A. Tarasenko, arXiv: 2408.03454 (2024).

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НИТЕВИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ:
СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЯ

В докладе рассматриваются фундаментальные и прикладные аспекты синтеза, свойств и приложений одномерных полупроводниковых наноструктур, перпендикулярных поверхности подложки. Такие наноструктуры называются нитевидными нанокристаллами (ННК), иначе – нановискерами. Полупроводниковые ННК обычно выращиваются на предварительно подготовленных поверхностях. В большинстве случаев используется активация поверхности металлическими каплями – катализаторами роста. Исследования ростовых процессов и свойств ННК процессов в настоящее время привлекают большой интерес. Это объясняется, в первую очередь, перспективными применениями ННК в различных областях микроэлектроники, оптоэлектроники, наномеханики и нанобиотехнологии. На основе ННК можно создавать полевые и гетеробиполярные транзисторы, светоизлучающие устройства со сверхнизким энергопотреблением, различные типы сенсоров, зонды для атомно-силовых микроскопов, автоэмиссионные катоды, туннельные диоды, одноэлектронные транзисторы, однофотонные излучатели и т.д. Чрезвычайно эффективная релаксация упругих напряжений на боковой поверхности позволяет выращивать бездислокационные ННК в сильно рассогласованных гетероэпитаксиальных системах, что невозможно в двумерных пленках. Уникальные транспортные, электрические, оптические, адсорбционные и иные характеристики ансамбля наноструктур определяются их размером и морфологией. Наличие нетривиальной связи между физическими характеристиками частиц и их геометрией делает актуальной задачу контролируемого выращивания наноструктур с заданным размером, плотностью и формой. Развитие исследований в области полупроводниковых ННК необходимо для решения важнейшей задачи: создания новых материалов с контролируемыми свойствами и широкой областью применения на основе непланарных нанообъектов. Следует подчеркнуть, что ННК формируются не в результате процессов самоорганизации, как многие другие наноструктуры, а за счет предварительной подготовки поверхности. Возможность прецизионного контроля диаметра, высоты, формы, плотности, структуры и состава ННК является, на наш взгляд, главным преимуществом, позволяющим существенно улучшить свойства материала и создать новое поколение функциональных наноустройств с качественно новыми характеристиками.

ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)

УДК 537.876.46

А.Я. Ахундов (студ., 5 курс, СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
М.В. Захарченко (асп., 4 год, СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

ТЕОРИЯ ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ В АНИЗОТРОПНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

В последние годы существенно возрос интерес исследователей к фотонным кристаллам с дефектами. Под дефектом подразумевается структурный элемент, введенный в фотонный кристалл, нарушающий его периодичность. Разнообразие форм и применяемых материалов для получения фотонных кристаллов с дефектами открывает огромное количество областей для их применения – активные части лазеров, фильтры на отражение и пропускание, всевозможные сенсорные структуры, волноводы и т. п. [1]. В связи с этим возникает необходимость развития строгой теории дефектных состояний в фотонных кристаллах. В перспективе данная теория может привести к развитию наиболее общего подхода к анализу взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурами, а также с метаматериалами [2], что особенно упростит задачу проектирования и конструирования новых приборов и компонентов фотоники.

В настоящей работе предлагается общий подход к анализу дефектных состояний в анизотропных фотонных кристаллах. Развиваемый в работе метод основывается на представлении стационарных уравнений Максвелла в операторной форме [3]. Можно выделить два подхода к решению данной задачи. Первый основан на точном решении уравнений Максвелла в фотонном кристалле с дефектом. Второй – на приближении эффективной среды для огибающих плавных функций. В работе исследуются одномерные фотонные кристаллы с произвольной анизотропией диэлектрической и магнитной проницаемостей. Были рассчитаны собственные моды одиночных и множественных дефектов. Показано, что собственные частоты локализованных на дефекте мод располагаются в фотонных запрещенных зонах. Предлагаемый подход отличается общностью и универсальностью. Он позволяет значительно снизить вычислительный ресурс и делает процедуру расчета применимой для регулярного использования. При этом появляется возможность исследования структур со сложной координатной зависимостью тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости в системе.

1. Ge J., Yin Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 1492 (2011).
2. М.В. Рыбин, М. Ф. Лимонов, *УФН*, **189**, 881 (2019).
3. Г.Ф. Глинский, *ЖТФ*, **89** (3), 329 (2019).

М.В. Ващенко (студ., 4 курс, СПбПУ),
М.Р. Шарнас (студ., 6 курс, СПбПУ),
Д.А. Пшенай-Северин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

РАСЧЕТ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ И ФОНОННОГО СПЕКТРА Mg_2Si И Mg_2Sn С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТА-GGA ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ R^2SCAN

Материалы на основе Mg_2Si , Mg_2Sn и их твердых растворов являются перспективными термоэлектриками с величиной термоэлектрической эффективности $ZT > 1$ [1]. Моделирование зонной структуры, фононных спектров и транспортных свойств этих материалов с помощью метода функционала плотности важно для анализа преобладающих механизмов рассеяния, оптимизации уровня легирования и составов твердых растворов для повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии. Mg_2Si и Mg_2Sn кристаллизуются в кубической структуре антифлюорита с параметрами решетки $a_0^{(expt)} = 6.338 \text{ \AA}$ и 6.765 \AA , соответственно. Материалы являются непрямозонными полупроводниками с максимумом валентной зоны в Γ точке зоны Бриллюэна и потолком валентной зоны в X-точке. Экспериментальные значения ширины запрещенной зоны при низких температурах составляют для них $\epsilon_g = 0.77$ и 0.35 эВ [1], соответственно. Использование градиентного GGA-приближения для функционала плотности хорошо воспроизводит постоянные решетки, но дает заниженные значения ширины запрещенной зоны в Mg_2Si (0.21 эВ), а для Mg_2Sn предсказывает полуметаллический спектр с энергетическим перекрытием валентной зоны и зоны проводимости на 0.24 эВ. Более точные значения можно получить с использованием гибридных функционалов или многочастичных поправок в GW-приближении, однако эти методы ресурсоемки, их трудно применять для расчетов свойств, требующих моделирования суперячеек, таких как фононные спектры. Использование Meta-GGA функционалов является компромиссным вариантом, обеспечивающим лучшую точность по сравнению с градиентным приближением при умеренных затратах вычислительных ресурсов.

В данной работе были проведены расчеты электронной структуры и фононных спектров Mg_2Si и Mg_2Sn с использованием современного варианта Meta-GGA функционала r^2SCAN . Постоянные решетки в Meta-GGA приближении оказались равны 6.328 \AA и 6.768 \AA , что хорошо согласуется с экспериментом. Ширина запрещенной зоны также описывается лучше ($\epsilon_g = 0.44$ и 0.124 эВ), чем в GGA-приближении. Это особенно важно для вычисления диэлектрической проницаемости Mg_2Sn , т.к. в GGA-приближении такой расчет был невозможен из-за нулевого значения ϵ_g . Величины статической и высокочастотной диэлектрической проницаемости для Mg_2Sn оказались равны $\epsilon_0 = 22.1$, $\epsilon_\infty = 15.2$, что хорошо согласуется с экспериментом (23.75 и 16.25, соответственно [2]). Полученные результаты позволили рассчитать фононные спектры обоих материалов с учетом LO-TO расщепления.

1. Zaitsev V.K. et al. in Thermoelectric handbook macro to nano, 29-1 (2006).
2. Kahan A. et al. Proc. Int. Conf. Phys. Semicond., Paris, 1067 (1964).

ИЗМЕРЕНИЯ R-T ЗАВИСИМОСТИ НЕЛЕГИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
АЛМАЗА В ОБЛАСТИ СВЕРХМАЛЫХ ТОКОВ

Нелегированный монокристаллический алмаз обладает свойствами высококачественного диэлектрика и имеет большой потенциал применения в оптоэлектронике для создания линеек и матриц УФ фотоприемников, датчиков заряженных частиц, рентгеновского и ультрафиолетового излучения.

В данной работе исследовались пластины специально нелегированного монокристаллического алмаза, выращенные методом высоких давлений – высоких температур (НРНТ) в НПК «Алмаз». Были сняты спектры пропускания образцов в УФ области спектра, пересчитанные зависимости коэффициента поглощения имели классический вид для края фундаментального поглощения (220 нм). Для электрических измерений на образцы наносились омические и Шоттковские контакты. Дiodные структуры, сформированные на слабо-легированном и нелегированном алмазе, обладают крайне низкими токами в обратном смещении, что требует использования в их диагностике прецизионных измерительных приборов. Для обеспечения измерений сверхмалых токов в существующий комплекс спектроскопии адмиттанса на базе криозондовой станции [1] был программно и аппаратно интегрирован параметрический анализатор Keysight B2901A, позволивший проводить измерения образцов в области токов 10^{-12} А и менее.

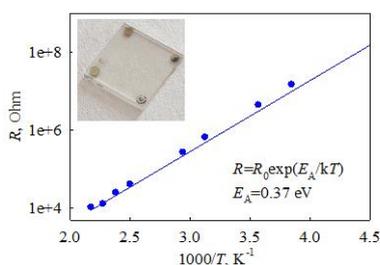


Рис.1. R-T характеристика

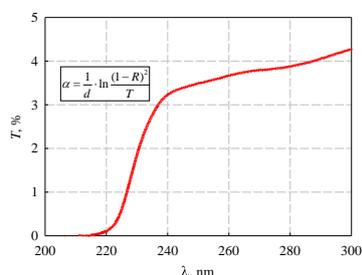


Рис. 2. Спектр пропускания

Проведен цикл прецизионных измерений ВАХ в диапазоне температур от 25 до 450 К; в измерениях зарегистрированы токи менее 10^{-10} А. Из построенной R-T зависимости была рассчитана энергия активация примеси в 370 мэВ, что соответствует справочному значению энергии активации бора в алмазе [2]. Дополнительные измерения C-V характеристик в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц позволили зарегистрировать частотно-зависимую концентрацию подвижных носителей заряда $p = (2-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2024-0005 (государственное задание Министерства науки и высшего образования РФ № 075-00003-24-00).

1. V.I. Zubkov et al. J. Appl. Phys. **118**, 145703 (2015). DOI:10.1063/1.4932664.
2. Zaitsev, A. M. Optical properties of diamond: a data handbook. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. — 502 с.

Д.А. Здравейшев (студ., 2 курс маг., каф. ФПЭН ННГУ; инж., НИФТИ ННГУ),
Ю.А. Данилов (к.ф.-м.н., доц., каф. ФПЭН ННГУ; в.н.с., НИФТИ ННГУ),
Ю.М. Кузнецов (к.ф.-м.н., доц., каф. ФПЭН ННГУ; н.с., НИФТИ ННГУ)

ИЗОВАЛЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА GaMnAs АЗОТОМ И ВИСМУТОМ

В настоящее время ведутся поиски способов модификации свойств арсенида галлия, которые смогли бы расширить круг его применений в полупроводниковой электронике. Одним из таких способов может выступать легирование изовалентными мышьяку примесями, например, висмутом или азотом. Введение висмута или азота в GaAs приводит к существенному изменению его свойств. Так, сообщается об уменьшении ширины запрещенной зоны при введении небольших концентраций висмута [1]. Аналогичное явление наблюдается и при введении азота [2]. Также известно о влиянии этих изовалентных примесей на свойства разбавленного магнитного полупроводника GaMnAs – одного из перспективных материалов полупроводниковой спинтроники [3-4].

В данной работе исследуемые структуры получались с использованием двух методик. Импульсным лазерным нанесением (ИЛН) в вакууме формировались структуры GaMnAs, а также GaMnAs:Bi. Образцы GaMnAs:N были получены комбинированным методом, представляющим собой ИЛН с последующим ионным внедрением азота с энергией ионов 10 кэВ и разными дозами облучения. Для устранения дефектов и электрической активации марганца структуры подвергались импульсному лазерному отжигу (ИЛО) импульсом эксимерного KrF-лазера с варьированием плотности энергии в импульсе. На полученных структурах исследовались магнитополевые зависимости эффекта Холла и магнетосопротивления в температурном диапазоне 7 – 300 К.

В работе показано, что соединения GaMnAs:Bi и GaMnAs:N являются ферромагнитными, для которых температура Кюри несколько понижается по сравнению с исходными слоями GaMnAs. Легирование висмутом приводит к изменению магнитной анизотропии в GaMnAs, увеличивается коэрцитивное поле и МС, что согласуется с данными [3]. Для слоев GaMnAs:N наблюдается увеличение коэрцитивного поля, что может быть связано с присутствием остаточных радиационных дефектов после ионной имплантации, а также с избыточной концентрацией азота, аналогично описанному в [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 24-79-00065).

1. A.R. Mohmad et al. // Phys. Status Solidi B. – 2014. – V.251, n.6. – P.1276.
2. L. Bellaiche, S.-H. Wei, A. Zunger // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V.70, n.26. – P.3558.
3. T. Andrearczyk et al. // Materials. – 2020. - V.13, n.23. – N.5507.
4. T. Manago, H. Akinaga // Jap. J. Appl. Phys. – 2008. – V.47, n.8. – P.6297.

К.М. Ключев (студ., 1 курс маг., СПбАУ им. Ж.И. Алферова),
 П.В. Петров (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО СЭМПЛИРОВАНИЯ

Экспериментально установлено, что в ферромагнитных полупроводниках степень компенсации влияет на магнитные свойства. Поэтому для исследования взаимосвязи ферромагнетизма и компенсации необходимо описать их в рамках одной теоретической модели. Ферромагнитные свойства были описаны методом плотности состояний в статье [1], поэтому задачей настоящей работы является применение метода плотности состояний для исследования свойств компенсированных полупроводников. Сумев описать полную плотность состояний системы $g(E, |\bar{p}|)$ через энергию и дипольный момент, можно рассчитать вероятность обнаружения системы в соответствующем состоянии:

$$f(E, m, T) = z^{-1} g(E, m) \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad z(E, p, T) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g(E, p) \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE dp,$$

где z – статистическая сумма. Зная плотность состояний, можно рассчитать многие термодинамические свойства системы, например, вычислить средний дипольный момент:

$$\langle \bar{p} \rangle = \int \int_{-\infty}^{+\infty} p \cdot f(E, p, T) dE dp.$$

Для вычисления плотности состояний системы случайно распределенных доноров и акцепторов удобно использовать численное моделирование. Метод прямого сэмплирования заключается в том, что мы вычисляем энергию и дипольный момент системы для случайного расположения зарядов, получая новый сэмпл. Повторив метод прямого сэмплирования большое число раз, получаем распределение состояний системы от дипольного момента и энергии системы. Была написана программа для сбора данных о числе состояний системы в зависимости от энергии системы и проекции дипольного момента. Данная программа выполнялась на компьютере с большей вычислительной мощностью с использованием библиотек по работе с матрицами CUBLAS. Написана вспомогательная программа для визуализации полученных данных и расчета параметров плотности состояний. Накопленный объем данных был использован для вывода аналитической формулы плотности состояний.

1. Bogoslovskiy N., Petrov P., Averkiev N. Phase diagram of a ferromagnetic semiconductor: Origin of superparamagnetism // Physical Review B. — 2024. — V. 109, № 2. — P. 024436.

М.А. Самсонов (студ., 2 курс маг., МГУ им. М.В. Ломоносова),
А.М. Смирнов (д.ф.-м.н., доц., МГУ им. М.В. Ломоносова, ИРЭ РАН)

ОСОБЕННОСТИ ЭКСИТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СЕЛЕНИДА ГАЛЛИЯ

Выдающиеся электронные характеристики графена вдохновили ученых на поиск новых двумерных слоистых материалов с подобными уникальными свойствами. Создание новых двумерных материалов становится перспективной областью в современных исследованиях материаловедения и физики конденсированных сред. Настройка электронных, оптических и магнитных свойств таких материалов открывает новые возможности для расширения сфер их применения. В последние годы особый интерес представляют материалы, имеющие слоистую структуру с сильными связями внутри слоёв и слабыми Ван-дер-Ваальсовыми взаимодействиями между слоями. Благодаря этому свойству возможно создание слоев данных материалов толщиной в одну элементарную ячейку кристаллической структуры. Слоистое бинарное соединение GaSe обладают уникальными полупроводниковыми свойствами и являются перспективными материалами для создания оптоэлектронных и фотодетектирующих устройств [1].

В данной работе представлены результаты исследования оптических и нелинейно-оптических свойств плёнок GaSe в зависимости от их толщины. При исследовании нелинейного поглощения и фотолюминесценции методом накачки и зондирования использовались плёнки GaSe, полученные методом механического отслаивания, толщиной от 0,5 до 6,8 мкм. Условия квантового ограничения в исследуемых плёнках не реализуются, однако с изменением толщины даже в пределах, далёких от размеров, удовлетворяющих условиям квантово-размерного ограничения, возможно существенное изменение поглощения и экситонных свойств селенида галлия. В плёнках GaSe с толщиной более 1 мкм обнаружено просветление на длине волны экситонного перехода (620 нм, 2 эВ) при возбуждении 10 нс импульсами на длинах волн 360 нм и 540 нм объяснено заполнением фазового пространства экситонов. В плёнках GaSe обнаружены 3 полосы в спектрах фотолюминесценции, которые могут быть связаны с излучательной рекомбинацией свободных экситонов (624 нм, 1,99 эВ), а также с излучением связанных экситонов (633 нм, 1,96 эВ) и донорно-акцепторной рекомбинацией (646 нм, 1,92 эВ) [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 24-12-00020.

1. Tang Y. et al, *Physical Review B.*, **94**, 125302 (2016).
2. Untila D. et al., *Physica status solidi (c)*., **12**, 65-69 (2015).

А.С. Слободнюк (студ., 1 курс маг., СПБАУ РАН),
М.С. Иванов (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
П.Б. Родин (д.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

БИПОЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ ГАННА: ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ

Эффект Ганна – неустойчивость однородного распределения электрического поля и спонтанное формирование движущихся доменов [1] – обусловлен отрицательной дифференциальной подвижностью электронов в арсениде галлия. Этот эффект наиболее изучен для полупроводников *n*-типа (классический монополярный эффект Ганна), однако возможен и при большой концентрации неравновесных носителей (биполярный эффект Ганна) [2,3]. В последние десятилетия биполярный эффект Ганна неожиданно и ярко проявил себя в арсенид-галлиевых приборах силовой импульсной электроники [3-7]. Ионизирующие биполярные домены оказались эффективным механизмом быстрой генерации неравновесных носителей, ответственным за субнаносекундное переключение [3,4], lock-on эффект [5,6] и субтерагерцовое излучение [7].

В настоящей работе выполнен линейный анализ устойчивости для биполярного эффекта Ганна в электронно-дырочной плазме. Найдены инкременты нарастания в зависимости от волнового вектора возмущения, напряженности электрического поля и концентрации плазмы. Две ветви решения дисперсионного уравнения традиционно соотносили с нарастающими волнами объемного заряда (дипольная флуктуация, аналогичная таковой в монополярном эффекте Ганна) и амбиполярными волнами (нейтральная флуктуация) [2]. Проведенный нами анализ собственных векторов линеаризованной задачи показывает, что представление о чисто дипольных и полностью нейтральных возмущениях оказывается неоправданной идеализацией. Дипольные и квазинейтральные возмущения отвечают одной ветви решений дисперсионного уравнения. Переход между ними при изменении электрического поля и волнового вектора является непрерывным.

Показано, что инкременты нарастания дипольных возмущений на порядки превосходят инкременты квазинейтральных возмущений, приводящих к формированию предсказанных в [2] плазменных амбиполярных волн. Этот результат находится в соответствии с результатами численного моделирования биполярного эффекта Ганна [3-6], которое обнаруживает в электронно-дырочной плазме именно сильнополевые домены.

1. J. V. Gunn, *Solid State Commun.* **1**, 88 (1963).
2. Б.Л. Гельмонт, М.С. Шур, *ФТП* **5**, 1082 (1971).
3. S.N. Vainshtein *et al.*, *J. Appl. Phys.* **97**, 024502 (2005).
4. M.S. Ivanov *et al.*, *Solid State Commun.* **379**, 115420 (2024).
5. A.R. Chowdhury *et al.*, *J. Appl. Phys.* **123**, 085703 (2018).
6. А.В. Рожков и др., *Изв. РАН, Серия физич.* **87**, 873 (2023).
7. S. N. Vainshtein *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 123501, (2019).

Н.С. Телицын (студ., 5 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
 Г. Касапиди (студ., 5 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
 А.В. Здравейщев (к.ф.-м.н., с.н.с., ННГУ, Лаб. спин. и опт. эл-ки),
 А.В. Соломникова (м.н.с., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ ДЛЯ ШИРОКОЗОННОГО АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ

В настоящее время особый научный и технологический интерес проявляется к третьему поколению полупроводников – широкозонным материалам, к которым относятся SiC, GaN, Ga₂O₃, алмаз. Из них наибольший интерес вызывает монокристаллический алмаз. Уникальные оптические, механические, химические и электрофизические свойства открывают целый спектр его потенциальных применений для различных областей электроники и фотоники.

В работе показан вариативный характер применения «классических» методов определения примесного состава и концентрации в алмазе, легированном бором [1]. Проведено комплексное исследование образца алмаза, представляющего собой структуру «эпитаксиальный слой, легированный бором, (толщиной 2,7 мкм) на подложке (тип Ib, толщиной 500 мкм)» методами: ВИМС, спектрофотометрия в УФ области спектра, Фурье спектроскопия в ИК области спектра (FTIR), вольт-фарадное (C-V) профилирование и метод Холла. Дополнительно выполнено численное решение уравнения электронейтральности и

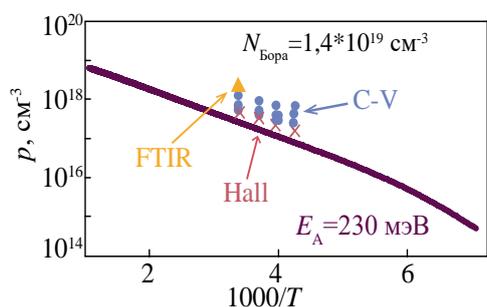


Рис. 1. Сплошная линия - расчет равновесной концентрации дырков от T . Крестики – холловская концентрация дырков, кружки – концентрация НЗ из C-V, треугольник – концентрация из FTIR.

расчет положения уровня Ферми. Сложность интерпретации получаемых экспериментальных данных заключается в крайне малой (доли процента) термической ионизации атомов примеси в алмазе.

Разброс значений измеренных концентраций объясняется тем, что FTIR-спектроскопия определяет концентрацию оптически активных атомов бора, и в случае эпи-структуры требует отдельного учета вклада поглощения как в эпи-слое, так и в подложке. Расчет концентрации из спектров FTIR калибруется по холловским измерениям [2], а они, в свою очередь, тестируют концентрацию подвижных носителей заряда, а не примеси в целом. Важно отметить, что C-V измерения широкозонного алмаза показывают сильную частотную дисперсию емкости, что приводит к разбросу на порядок рассчитанной концентрации неравновесных свободных носителей заряда. Также обсуждается учет компенсации примеси для каждого из методов.

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE2024-0005 (государственное задание Минобрнауки Российской Федерации № 07500003-24-00).

1. В.И. Зубков и др. Методы диагностики структур нанoeлектроники и фотоники: уч. пос., 2015.

2. D. Howell et al. Diam. Relat. Mat., 96, 2019. 10.1016/J.DIAMOND.2019.02.029.

В.С. Бердников (асп., 1 год, Лаборатория оптики спина им. И.Н. Уральцева, СПбГУ),
К.В. Кавокин (д.ф.-м.н., в.н.с., Лаборатория оптики спина им. И.Н. Уральцева, СПбГУ)

СПИН-РЕШЕТОЧНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЯДЕР В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ GaAs:Mn

В данной работе представлено теоретическое моделирование динамики ядерной спиновой системы в объемном GaAs, легированном ионами марганца (концентрация глубокого акцептора Mn $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), в условиях оптического возбуждения при температуре 4,5 К. Ранее эксперименты показали, что время спин-решеточной релаксации ядер в условиях оптической ориентации электронных спинов имеет зависимость от величины внешнего магнитного поля и достигает 12 секунд для исследуемого образца [1]. Такое поведение нетипично для полупроводников р-типа и больше схоже с динамикой ядерной спиновой системы в GaAs n-типа [2].

Для определения причин существенного отличия времени спин-решеточной релаксации в p-GaAs и в GaAs:Mn проведена оценка влияния двух возможных механизмов релаксации ядерного спина, специфических для данного материала: релаксации за счет сверхтонкого взаимодействия с локализованными на глубоких акцепторах Mn дырками, и релаксации во флуктуирующих полях парамагнитных центров.

Оценка времени T_1 за счет ограниченной спиновой диффузией сверхтонкого взаимодействия ядер с дырками, локализованными на глубоких акцепторах Mn, произведена на основе формулы Хуцишвили – Де Жена [3]. Полученное значение составляет 29 секунд.

При моделировании времени спин-решеточной релаксации, связанной с акцепторами Mn, принималась во внимание возможность нахождения акцептора в двух зарядовых конфигурациях: заряженной и нейтральной. Время корреляции определено временем спиновой релаксации дырки и оценено по ширине соответствующей линии в спектре ЭПР. Для состояний Mn^- время T_1 составляет 176 секунд, для состояний Mn^0 - порядка 4000 секунд.

Таким образом, спин-решеточная релаксация ядер под действием флуктуирующих магнитных полей парамагнитных центров Mn в GaAs не играет существенной роли. Ограниченная спиновой диффузией релаксация за счет сверхтонкого взаимодействия с локализованными на глубоких акцепторах Mn дырками может вносить заметный вклад в скорость релаксации, однако скорее всего она сочетается с квадрупольной релаксацией под действием электрических полей, создаваемых флуктуациями заряда примесей, которая играет важную роль в спин-решеточной релаксации ядер в немагнитных кристаллах GaAs n- и p-типа [2].

1. Berdnikov V.S et al., *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. **17 (1.1)**, pp. 31–36 (2024).
2. M. Kotur et al., *Phys. Rev. B.*, **97** 165206 (2018).
3. G. R. Khutsishvili, *JETP*, vol. **4**, № **3**, (1957).

Р.С. Назаров (асп., 2 год, СПбГУ, каф. фотоники),
 И.А. Соловьёв (к.ф.-м.н., СПбГУ, каф. фотоники),
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. фотоники)

УСТОЙЧИВЫЕ СВОБОДНЫЕ ЭКСИТОНЫ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА MAPbI_3

Прямозонные полупроводники обладают уникальным свойством – наличием состояния свободного экситона с большой силой осциллятора. Это свойство делает их весьма перспективными для применения в сверхбыстрой обработке оптических сигналов и оптических вычислениях. Один из протоколов для оптических вычислений может быть основан на эффекте четырехволнового смешения (ЧВС). Настоящая работа демонстрирует этот нелинейный оптический эффект в поликристаллических тонких пленках галогенидного перовскита MAPbI_3 ($\text{MA}^+ = \text{CH}_3\text{NH}_3^+$) при низких температурах. Анализируя спектроскопию сигнала ЧВС, изучая спектры возбуждения фотолюминесценции и сравнивая наши результаты с результатами для монокристаллов MAPbI_3 , мы обнаружили, что наиболее сильный нелинейный отклик наблюдается в резонансе, связанном со свободным экситоном, в области неглубоких дефектных состояний. Неожиданно было также обнаружено наличие сигнала ЧВС в геометрии перпендикулярного линейного возбуждения, что указывает на потенциальное участие других нелинейных эффектов или эффектов множества тел. Наши наблюдения ЧВС с участием свободных экситонов даже в высокодефектных тонких пленках MAPbI_3 демонстрируют устойчивость экситонного резонанса и подчеркивают практические перспективы использования этого материала в оптических вычислениях.

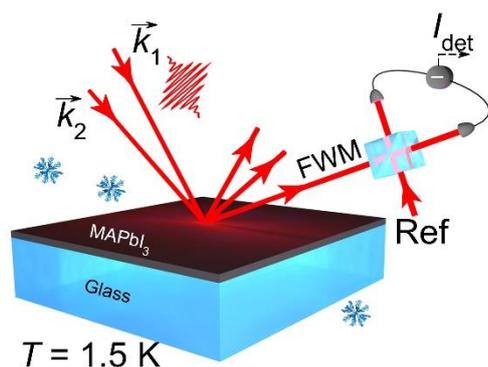


Рис. 1. Схема эксперимента ЧВС. Два лазерных импульса от одного и того же источника падают на тонкую пленку MAPbI_3 при температуре 1,5 К с разными волновыми векторами \vec{k}_1 и \vec{k}_2 . Когерентный отклик ЧВС наблюдается в геометрии отражения в направлении $2\vec{k}_2 - \vec{k}_1$ только при наличии обоих импульсов. Сигнал ЧВС определяется путем взаимной корреляции с эталонным импульсом от того же лазерного источника.

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Мегагрант № 075-15-2022-1112).

Б.М. Фоминых (асп., 1 год., и.-и., ИФМ УрО РАН),
А.Н. Перевалова (к.ф.-м.н., н.с., ИФМ УрО РАН),
В.Ю. Ирхин (д.ф.-м.н., г.н.с., ИФМ УрО РАН),
С.В. Наумов (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ УрО РАН),
К.В. Шаломов (м.н.с., ИЭФ УрО РАН),
Н.В. Гущина (к.ф.-м.н., с.н.с., ИЭФ УрО РАН),
В.В. Марченков (д.ф.-м.н., г.н.с., ИФМ УрО РАН)

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ АРГОНА НА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ФАЗУ БЕРРИ В ТОПОЛОГИЧЕСКОМ ИЗОЛЯТОРЕ Bi_2Se_3

Облучение высокоэнергетическими частицами – эффективный способ модификации физических свойств топологических изоляторов. Этот процесс может создавать дефекты, изменять химический состав поверхности и приводить к возникновению новых электронных состояний [1]. Помимо этого, облучение может индуцировать такие магнитотранспортные эффекты, как эффект отрицательного магнитосопротивления, эффекты слабой локализации и антилокализации, эффект зарядовых луж [2].

На данный момент Bi_2Se_3 является одним из наиболее изученных топологических изоляторов. Несмотря на это, остается открытым вопрос о влиянии облучения высокоэнергетическими ионами на структуру и свойства данного соединения.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование магнитотранспортных свойств монокристаллов топологического изолятора Bi_2Se_3 до и после облучения ионами аргона. Было обнаружено, что облучение приводит к росту электросопротивления, уменьшению отношения сопротивлений RRR , концентрации и подвижности носителей тока. Помимо этого, облучение привело к значительному качественному и количественному изменению зависимостей магнитосопротивления, что может быть обусловлено значительным изменением электронной структуры исследованных образцов.

Известно, что в топологических изоляторах электрон, двигаясь по циклотронной орбите вокруг точки Дирака в поверхностной зоне Бриллюэна, приобретает дополнительную геометрическую фазу Берри, равную π , при этом осцилляции магнитосопротивления Шубникова–де Гааза отражают эту фазу. В данной работе было обнаружено, что облучение может приводить к исчезновению фазы Берри. Показано, что для корректного описания этого эффекта важен учет эффекта Зеемана и неидеальности дираковского закона дисперсии для поверхностных состояний.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-72-00168.

1. S. Abhirami et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* (2024).
2. C.W. Rischau et al., *New J. Phys.*, **18**, 073024 (2016).

И.В. Чуманов (асп., 1 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
О.С. Комков (д.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
М.С. Ружевич (асп., 4 год, Университет ИТМО, фак. ИПСПД),
К.Д. Мынбаев (д.ф.-м.н., Университет ИТМО, фак. ИПСПД)

ФОТООТРАЖЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$ В СРЕДНЕВОЛНОВОМ ИК ДИАПАЗОНЕ

Твердые растворы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) востребованы для создания матричных фотодетекторов в средневолновом ИК диапазоне (3–5 мкм). Интерес к КРТ обусловлен возможностью гибкого управления запрещенной зоной, высокими показателями квантовой эффективности и времени жизни носителей заряда. Одной из важных задач является интерпретация спектров фотолюминесценции (ФЛ) КРТ, в частности, сигналов, соответствующих межзонным переходам [1]. В данной работе для независимого определения энергии межзонного перехода КРТ применялся метод фотоотражения (ФО).

В работе исследовались эпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(013) с буферными слоями ZnTe и CdTe. Образцы различались степенью легирования и условиями отжига. Измерения спектров ФО проводились на ИК фурье-спектрометре Vertex 80 по методике с фазовой коррекцией модуляционного сигнала, описанной в работе [2].

Спектры ФЛ КРТ помимо краевой люминесценции могут содержать полосы, связанные с собственными дефектами и примесными уровнями. В работе [3] предложен метод идентификации сигналов с помощью зависимости $I_{PL} \sim P_{Laser}^k$, где по степени k определяется вид перехода. Для выделения сигнала от межзонных переходов из спектра обычно применяют функцию Гаусса, но это приводит к синему сдвигу получаемого значения энергии [1].

В работе показано, что метод ФО позволяет исследовать межзонные переходы в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ без дополнительных измерений и проведения сложного анализа спектров. Для слоев КРТ с заданным составом $x = 0.293\text{--}0.297$ были зафиксированы переходы с энергиями 210–230 мэВ, что ниже расчетных значений E_g и может быть связано с флуктуациями состава, протяженными дефектами, скоплением примеси. Таким образом, ФО является альтернативным методом определения энергии межзонных переходов, что актуально для углубленного изучения свойств КРТ и оптоэлектронных структур на их основе.

Авторы работы выражают благодарность В.С. Варавину и М.В. Якушеву из ИФП СО РАН за предоставление образцов для исследований.

1. K. Murawski et al., *Metrol. Meas. Syst.*, **30**(1), 183–194 (2023).
2. Д.Д. Фирсов и др., *Письма в ЖЭТФ*, **39**(23), 87–94 (2013).
3. T. Schmidt et al., *Physical Review B*, **45**(16), 8989 (1992).

И.В. Шевченко (асп., 3 год, МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ФНТиСП),
Е.П. Скипетров (д.ф.-м.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ФНТиСП)

ПАРАМЕТРЫ ПРИМЕСНОЙ ЗОНЫ КОБАЛЬТА В СПЛАВАХ $Pb_{1-x-y}Sn_xCo_yTe$

В теллуриде свинца глубокие уровни примесей 3d переходных металлов с переменной валентностью в основном являются резонансными: уровни элементов из первой половины ряда находятся в зоне проводимости (Sc, Ti, Cr) или под самым ее дном (V), а уровни Fe и Ni – в окрестности потолка валентной зоны [1]. С ростом содержания олова в матрице сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ все эти уровни с примерно одинаковой скоростью смещаются вниз по энергии, могут достигать потолка «тяжелой» валентной Σ -зоны и приводить к увеличению термоэлектрической эффективности сплавов [2]. Уровень Co, возможно, расположен вблизи уровня Ni, но его энергетическое положение пока не определено.

Для обнаружения уровня Co изучены температурные зависимости коэффициента Холла R_H ($4.2 \leq T \leq 300$ К, $B = 0.07$ Тл) в образцах из двух монокристаллов $Pb_{1-x-y}Sn_xCo_yTe$ ($x = 0.06$ – 0.14) с разными исходными концентрациями примеси ($y = 0.01, 0.02$). Во всех образцах, как и в сплавах $Pb_{1-y}Sn_xTe$, легированных Cr, Fe и Ni [1], коэффициент Холла сначала не изменяется, а затем увеличивается с ростом температуры примерно в 2–2.5 раза. Такое поведение объяснялось ранее пиннингом уровня Ферми резонансным примесным уровнем и перетеканием носителей заряда из зоны на уровень при изменении их взаимного расположения с ростом температуры. Однако оказалось, что в образцах с одинаковым содержанием олова и разными концентрациями Co концентрации дырок p различаются в 2–8 раз и согласованное теоретическое описание зависимостей $R_H(T)$ в них возможно только в предположении существенного уширения примесного уровня в примесную зону.

В рамках двухзонного закона дисперсии Кейна проведено численное решение уравнения электронейтральности и построены теоретические зависимости $R_H(T)=1/[e\rho(T)]$, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными. При этом использовались значения композиционного и термического коэффициентов движения уровней Fe и Ni и гауссовский вид функции плотности состояний в примесной зоне Co, а ширина примесной зоны варьировалась в диапазоне $\sigma=15\pm 5$ мэВ. Показано, что емкость примесной зоны, соответствующая концентрации ионов примеси Co, растворенных в подрешетке металла, составляет $N_{Co}=(0.04\text{--}5.0)\cdot 10^{19}$ см⁻³ и в образцах из монокристаллов с $y=0.01$ и $y=0.02$ увеличивается с ростом содержания олова примерно в 6 и 12 раз, оставаясь существенно меньше концентрации введенной примеси. Получены зависимости концентрации дырок в примесной зоне p_{Co} и степени ее заполнения p_{Co}/N_{Co} от концентрации олова. Показано, что с ростом содержания олова в образцах из двух монокристаллов степень заполнения дырками медленно увеличивается в интервалах 0.8–0.9 и 0.15–0.25, соответственно.

1. E.P. Skipetrov et al., *Low Temp. Phys.*, **47**, 24 (2021).
2. J.P. Heremans et al., *Science*, **321**, 554 (2008).

А.А. Яковлева (асп., 2 год, ННГУ, ФПЭН, м.н.с., НИФТИ),
А.В. Кудрин (д.ф.-м.н., проф., ННГУ, ФПЭН, с.н.с., НИФТИ)

НОВЫЙ ТИП ФЕРРОМАГНИТНЫХ GaAs СТРУКТУР, ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННЫХ Fe

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) на основе GaAs, сильно легированные Fe, обладают собственными ферромагнитными свойствами до температур выше комнатной [1]. Однако, для получения РМП вводят большое количество примеси, которая ухудшает кристаллическую структуру РМП. В данной работе были получены структуры на основе GaAs, дельта-легированные Fe. Введение примеси в виде дельта-слоя потенциально позволяет уменьшить влияние на кристаллическое совершенство структуры и увеличить локальную концентрацию атомов Fe, что может привести к усилению обменного взаимодействия между ними. Выращивание образцов производилось при различных технологических параметрах с помощью метода импульсного лазерного осаждения, который позволяет вводить высокие концентрации примеси. Для структур с временем распыления Fe 45 секунд ПЭМ-изображения поперечного сечения образца демонстрируют высокое кристаллическое совершенство структуры и подтверждают эпитаксиальный рост. Магнитные и транспортные свойства структур исследовались с помощью эффекта магнитного циркулярного дихроизма (МЦД), эффекта Холла и магнитосопротивления. Структуры с временем нанесения Fe 35 с и 45 с при температуре роста буферного слоя 200°C и 500°C, соответственно, обладают собственными ферромагнитными свойствами до температуры ~ 110 К, на что однозначно указывает наличие спектральной зависимости эффекта МЦД. Структура с временем нанесения Fe 35 с имеет отрицательное магнитосопротивление, которое свидетельствует о наличии спин-зависимого рассеяния носителей в структуре. Отрицательное магнитосопротивление сохраняется до температуры не ниже 110 К, что согласуется с результатами, полученными с помощью эффекта МЦД. Однако, в структуре с временем нанесения Fe 45 с при температуре роста буферного слоя 200°C отсутствует спектральная зависимость эффекта МЦД, что указывает на формирование какой-то второй интерметаллической фазы, сохраняющей свои магнитные свойства до температуры не ниже 130 К. При этом в этой структуре отсутствует отрицательное магнитосопротивление, но наблюдаются зависимости аномального эффекта Холла, сохраняющиеся до 130 К, так же как и в эффекте МЦД.

Работа профинансирована за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00151, <https://rscf.ru/project/24-22-00151/>.

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

ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)

УДК 539.21

И.С. Белоконь (студ., 4 курс бак., ННГУ, ФПЭН),
А.В. Нежданов (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, ФПЭН),
А.А. Скрылев (асп., 1 год, ННГУ, ФПЭН), А.И. Машин (д.ф.-м.н., проф., ННГУ)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК $ZnSnN_2$

В нашем мире энергия в основном производится за счёт невозобновляемых источников энергии: уголь, газ, нефть, уран. Их резервы огромны, но по главному закону экономики, потребности человека бесконечно растут, поэтому нам просто необходимо научиться использовать восполняемые ресурсы. Солнечная энергетика – это потенциальная и полностью нереализованная сфера применения возобновляемых источников энергии. Самый популярный на сегодняшний день материал для солнечных элементов – это кристаллический кремний, но КПД таких устройств держится на относительно низком уровне $\sim 20\%$ [1]. Ко всему прочему, производство таких солнечных батарей является токсичным и дорогим.

Соединение $ZnSnN_2$ (ZTN – Zinc Tin Nitride) имеет ряд преимуществ в качестве материала для солнечных ячеек [2, 3]: во-первых, элементы, из которых состоит ZTN, выгодны и безопасны в производстве; во-вторых, теоретически рассчитанная ширина запрещённой зоны $\sim 1,42$ эВ [4] позволит достигнуть максимальное значение КПД $\sim 33\%$ [5].

Исследуемые образцы были получены магнетронным совместным распылением мишеней Zn (99,995%) и Sn (99,999%). Азот подавали в роли реактивного газа в составе смеси с аргоном. В результате анализа спектров коэффициентов пропускания и отражения, спектра показателя поглощения и эффекта Холла были сделаны следующие выводы: оптическая ширина запрещённой зоны лежит в пределах 1,4 – 1,8 эВ, демонстрируя тем самым возможность достижения высокой эффективности преобразования излучения; полученные образцы n-типа с концентрацией носителей $\sim 10^{20}$ см⁻³, что свидетельствует о наличии эффекта Бурштейна–Мосса; показатель поглощения достигает значений 10^5 см⁻¹, что позволяет наносить более тонкие, но не менее эффективные с точки зрения поглощающих свойств, плёнки. Была также отмечена зависимость всех этих свойств от соотношения Zn и Sn в составе материала подложки.

Таким образом, несмотря на медленную интеграцию $ZnSnN_2$ в производство солнечных батарей, его свойства демонстрируют огромный потенциал для достижения высокого КПД.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства "Приоритет 2030" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

1. В.А. Миличко, А.С. Шалин, Успехи физических наук, 2016. Т. 186, № 8. – С. 801–852.
2. A. Nezhdanov et al., Opt. Mat. **144** (2023) 114335.
3. A. Nezhdanov et al., Opt. Mat. **156** (2024) 116035.
4. A. Laidouci et al., *Helv. Phys. Acta* **96** (2023) 013101.
5. W. Shockley, H. J. Queisser et al., *J. Appl. Phys.* **32** 510–519 (1961).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СЛОЕВ GaN, n-GaN и p⁺-GaN,
СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ GaN/c-Al₂O₃

Нитриды третьей группы (A^{III}N) являются полупроводниками третьего поколения, расширение диапазона применения которых активно изучается в последние десятилетия. Уникальность физико-химических и электрических параметров полупроводниковых соединений A^{III}N уже позволили создать ряд передовых и компактных устройств. Для создания приборных технологических решений на основе GaN может использоваться формирование активных областей GaN на гетероструктурах типа «GaN/подложка», в которых буферный слой уже синтезирован на подложке (Si, SiC, сапфир) при помощи эпитаксиальных технологий. При использовании РА МВЕ эффективность активации молекулярного азота не зависит от температуры подложки, что позволяет использовать температуры роста от экстремально низких до максимально возможных для данной технологии значений ~900°C. При этом изменение стехиометрических условий роста при РА МВЕ позволяет управлять морфологией поверхности слоев в процессе их синтеза. Эта особенность используется для фильтрации прорастающих дислокаций, наблюдаемой при переходе от Ga- к N-обогащенным условиям роста. Формирование качественного омического контакта с низким контактным сопротивлением в приборах на основе широкозонных соединений A^{III}N до сих пор является нерешенной проблемой. В настоящее время проводится широкий спектр исследований по созданию омических контактов без использования процедуры высокотемпературного отжига, в частности, при помощи эпитаксиального доращивания сильно легированных кремнием контактных слоев.

В настоящей работе показано, что с использованием технологии РА МВЕ могут быть сформированы структурно-качественные эпитаксиально-доращиваемые контактные GaN, n-GaN и p⁺-GaN на виртуальных подложках GaN/c-Al₂O₃ в Ga-обогащенных условиях при относительно низких температурах роста ~700°C. Показано, что на начальной стадии роста контактных слоев при использовании методики предэпитаксиальной очистки [1] происходит эффективная фильтрация дислокаций, прорастающих из буферного слоя GaN подложки, сформированного методом МOCVD. Выполненные на основе данных рентгеновской дифракции и рамановской микроспектроскопии расчеты величин плоскостной и внеплоскостной деформаций, а также остаточных биаксиальных напряжений указывают на высокое структурное качество сформированного контактного слоя – независимо от уровня легирования кремнием. Определенное с помощью метода передающей линии контактное сопротивление, приведенное к ширине площадки, для структуры с контактным слоем p⁺-GaN составило ~0.11 Ом·мм, а для n-GaN ~0.5 Ом·мм.

1. A. Mizerov et al., *Semiconductors*, **53**, 1187 (2019).

Е.Ф. Канафиева (студ., 1 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», лаб. ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Д.С. Кузин (асп., м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Е.Ю. Лобанова (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ПОЛУЧЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК WSe_2 НА ПОВЕРХНОСТИ $Al_2O_3(0001)$ И $CaF_2(111)$

Двумерные дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) образуют класс слоистых материалов, обладающих рядом перспективных свойств. Среди них селенид вольфрама WSe_2 обладает одной из самых высоких подвижностей носителей заряда p-типа. Его практическое использование ограничивается повышенной концентрацией дефектов и ловушек на интерфейсе ДПМ с традиционными аморфными диэлектриками. Ввиду этого особый интерес представляет использование кристаллических подзатворных диэлектриков, таких как фторид кальция $CaF_2(111)$ и сапфир $Al_2O_3(0001)$, с помощью которых возможна реализация быстродействующих и надежных электронных устройств. Целью данной работы являлся рост слоёв WSe_2 на поверхности подложек $Al_2O_3(0001)$ и $CaF_2(111)$.

Образцы WSe_2 были выращены методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии. Эксимерный KrF-лазер CompexPro 201 ($\lambda \approx 248$ нм) применялся для абляции материала поликристаллической мишени WSe_2 . Энергия лазерных импульсов изменялась в пределах от 100 до 600 мДж. Температура подложки в процессе роста поддерживалась равной 500 °С. Для снижения кинетической энергии вылетающих из мишени частиц использовался буферный газ (аргон), давление которого изменялось от 0.025 до 0.2 мбар. Контроль кристаллической структуры пленок проводился с использованием метода дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Для изучения морфологии пленок образцов использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Была исследована зависимость морфологии поверхности пленки от условий роста в камере и предварительной обработки подложек $Al_2O_3(0001)$. Наименьшая шероховатость пленок реализовывалась при использовании давления буферного газа 0.1 – 0.2 мбар. Было обнаружено, что при росте на неотожженной подложке $Al_2O_3(0001)$ кристаллическая решетка WSe_2 была развернута на 30° относительно направления [100] подложки, в то время как предростовой отжиг подложки $Al_2O_3(0001)$ при 1000 °С в течение 1 ч приводил к росту WSe_2 с решеткой, сонаправленной с решеткой подложки. Для гетероструктур $WSe_2/CaF_2(111)$ оптимальное давление составило 0.05 мбар. Для данных гетероструктур в процессе роста наблюдались осцилляции интенсивности рефлексов ДБЭ, что подтверждает реализацию эпитаксиального роста в послойном режиме. Картины ДБЭ выращенных пленок продемонстрировали хорошее совпадение с модельной решеткой, из чего можно сделать вывод о высоком качестве и кристалличности структуры.

Работа была поддержана фондом РФФИ в рамках проекта № 21-52-14007 АНФ_а. Авторы выражают благодарность С.М. Сутуруину, А.М. Коровину и Н.С. Соколову за обсуждение результатов работы.

П.Д. Корниенко (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ИЭиТ; лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
О.А. Хвостикова (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Р.А. Салий (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ AlGaAs ИЗ Bi-СОДЕРЖАЩИХ РАСПЛАВОВ

В последнее время ведутся исследования по созданию лазерных фотоэлектрических преобразователей с вертикальным (относительно источника света) p-n переходом [1]. В таких фотопреобразователях световой поток вводится с боковой (торцевой) поверхности. Отличительной особенностью фотоэлектрических преобразователей с вертикальным p-n переходом на основе AlGaAs/GaAs является наличие относительно толстого слоя $Al_xGa_{1-x}As$ (более 50 мкм) с градиентным составом (и, следовательно, переменным показателем преломления). Благодаря градиенту состава волноводного слоя $Al_xGa_{1-x}As$ вводимое с торца излучение преломляется в сторону фотоактивной области структуры.

Такие достаточно толстые эпитаксиальные слои экономически целесообразно получать методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Однако для получения $Al_xGa_{1-x}As$ большой толщины необходима высокая начальная температура эпитаксии (850–900 °С), при которой вероятность фонового легирования заметно возрастает. Основной фоновой примесью при использовании графитовых кассет в ЖФЭ является углерод (акцептор). В связи с этим нелегированные слои, выращенные традиционным для ЖФЭ способом из расплава Ga при $T = 900^\circ\text{C}$ имеют p-тип проводимости.

В данной работе для решения проблемы снижения уровня фонового легирования и получения слоев n-типа проводимости были проведены исследования кристаллизации твердого раствора AlGaAs из Ga-Bi расплава, которые показывают, что использование висмут-содержащих расплавов влияет на встраивание примесей в кристаллическую решетку AlGaAs. На основании данных метода Холла установлено, что при содержании висмута в расплаве галлия 1 ат.% и более сохраняется исходный n-тип проводимости AlGaAs слоя, что упрощает технологический процесс создания гетероструктуры с заданными параметрами. Показано, что оптимальное содержание висмута в расплаве галлия варьируется в диапазоне 1–20 ат.%, так как при таких концентрациях висмут не оказывает существенного влияния на скорость роста слоя AlGaAs. Разработанная методика получения эпитаксиальных слоев AlGaAs также может быть использована для получения эффективных светодиодных структур [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00057, <https://rscf.ru/project/22-19-00057>.

1. V.P. Khvostikov et al., Side-input GaAs laser power converters with gradient AlGaAs waveguide. *IEEE Electron Device Lett.* **43**, 1717–1719 (2022).
2. H. Kitabayashi et al. Development of super high brightness infrared LEDs. *SEI Tech. Rev.* **72**, 86–89 (2011).

П.Д. Корниенко (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ИЭиТ),
С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, В.П. Хвостиков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ЦФНГ)

ПАССИВАЦИЯ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЗКОЗОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Все большее число научных центров России и мира исследуют фотоэлектрическое преобразование лазерного излучения. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе лазерные преобразователи разработаны для различных полупроводниковых материалов и длин волн, в том числе – германия [1] и антимонида галлия [2]. Указанные преобразователи оптимизированы под падающее излучение с $\lambda \sim 1550$ нм, попадающее в окно прозрачности атмосферы и оптоволокна и востребованные при беспроводной передаче энергии на расстояние.

Предлагаемый в работе способ формирования преобразователя связан с пассивацией поверхности Ge или GaSb кремнием. Задача пассивации – устранение оборванных связей, которые влияют не только на скорость поверхностной рекомбинации, но приводят к появлению электронных состояний в запрещенной зоне, повышающих, в свою очередь, токи утечки. Формирование структур осуществлялось диффузией цинка из газовой фазы через пассивирующую пленку кремния толщиной $\sim 150\text{--}200$ Å. Очевидно, что на скорость диффузии влияет не только температура процесса, но и структурные свойства такой Si-пленки. В этой связи применялась пассивация как поликристаллическим, так и аморфным кремнием. Диффузионный отжиг при температуре $600\text{--}660$ °C для германия и 500 °C для GaSb осуществлялся в течение 30–35 минут.

Изготавливались преобразователи с площадью подвода излучения $S_{\text{DIA}} = 6.56$ мм² или 3.14 мм². Разрабатываемый способ обеспечил формирование качественного p–n-перехода и воспроизводимое получение чипов с высокими значениями внутреннего квантового выхода Q_{int} , фактора заполнения нагрузочной характеристики FF и напряжения холостого хода V_{OC} . Для преобразователей на основе GaSb получены $V_{\text{OC}} \geq 0.5$ В ($7\text{--}10$ А/см²), для Ge – более 0.3 В ($7\text{--}8$ А/см²). Высокая степень легирования подконтактных областей ($p > 10^{19}$ см⁻³) обеспечила значения $FF \geq 70\%$ и $\sim 60\%$ для GaSb и Ge, соответственно. Значения Q_{int} ($\lambda = 1500$ нм) для диффузии в Ge через пленку α -Si составили 84%. В отношении антимонида галлия пассивация α -Si на настоящий момент оказалась более результативной по сравнению с поликристаллическим кремнием.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20018, <https://rscf.ru/project/24-29-20018/> и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 24-29-20018.

1. О. Хвостикова, С. Сорокина et al., *ЖТФ*, **94** (5) 801 (2024).
2. В. Хвостиков, С. Сорокина et al., *ФТП*, **49** (8) 1104 (2015).

А.С. Кравченко (студ., 1 курс маг., ННГУ),
О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников (НИФТИ ННГУ), А.В. Нежданов (ННГУ)

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР «УГЛЕРОДНАЯ ГРАФЕНОПОДОБНАЯ ПЛЕНКА/Ge» И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Интерес к созданию фотоприемных и светоизлучающих структур на Ge связан с перспективами их интеграции в Si технологию. Большинство Ge фотодетекторов имеет структуру металл/полупроводник; при этом основными проблемами являются высокие темновые токи, обусловленные относительно низким потенциальным барьером металл/Ge, в том числе из-за закрепления уровня Ферми на границе раздела. Графеновые слои успешно использованы в качестве промежуточного слоя между металлом и полупроводником при изготовлении высокочувствительных детекторов на Ge [1].

В настоящей работе углеродный слой (C-слой) на поверхности Ge(111) был выращен методом импульсного лазерного распыления пирографита в вакууме. Температура подложки составляла 500°C, а время процесса 20 с. Исследованы электрические и оптические свойства структур. В частности, показано, что спектр комбинационного рассеяния света (КРС) состоит из двух частей: при низких волновых числах (200–400 см⁻¹) виден одиночный пик при 300.6 см⁻¹, очевидно, связанный с LO-фононом Ge, поскольку C-слой практически прозрачен для лазерного излучения с длиной волны 473 нм. Вторая часть спектра КРС состоит из линий, характерных для углеродных слоев. Отметим узкую линию G при 1605 см⁻¹, типичную для графитоподобных материалов с sp² связями между атомами углерода. Пик D при 1371 см⁻¹ ассоциируется с наличием дефектов в графеновой плоскости. Пики 2D и D+D' слились в одну широкую полосу при 2700–3000 см⁻¹. Общий вид спектра является типичным для многослойного графена. Оценка параметров этого графеноподобного C-слоя по методике [2] дает число слоев графена ~5, а размер зерна графена – приблизительно 6 нм.

Были изготовлены структуры типа Au/C-слой/n-Ge(111). При этом толщина C-слоя составила 4 нм, а слой Au был нанесен методом электронно-лучевого испарения. Фотолитография в сочетании с химическим травлением Au и травлением в кислородной плазме C-слоя на периферии позволили сформировать меза-структуры диаметром 450 мкм. Исследованы вольт-амперные характеристики диодов. Темновые обратные токи составляли ~10⁻⁵ А при -1.2 В, что значительно меньше токов для диода Au/Ge, и находятся на уровне опубликованных результатов [1]. Структура обладает значительной фоточувствительностью в диапазоне длин волн 1–2 мкм.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

1. H. Jiang et al., *Nanotechnology*. **33** 345204 (2022).
2. A.C. Ferrari, *Solid State Communications*. **143** 47 (2007).

Ю.А. Ладанова (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ФизМех),
В.Н. Загороднева (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ФизМех),
П.А. Дворцова (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
С.М. Сутурин (к.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
В.В. Федоров (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),
В.И. Сахаров (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Н.С. Соколов (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ

Одним из активно развивающихся направлений развития наноэлектроники сегодня является создание фотонных интегральных схем для работы сверхбыстрых, энергоэффективных устройств. Электрооптические модуляторы являются неотъемлемой частью таких систем. Возможность оптической модуляции обеспечивается электрооптическим эффектом, возникающим в волноводной структуре и позволяющим получать необходимое изменение оптических свойств материалов волновода при воздействии электрических полей [1]. Титанат бария (BaTiO_3 , ВТО) является функциональным полупроводником, демонстрирующим один из самых больших известных электрооптических коэффициентов, что делает его идеальным кандидатом для применения в модуляторах фотонных интегральных схем [2].

Настоящая работа посвящена получению эпитаксиальных пленок ВТО / MgO (001), а также характеристике их структурных и электрофизических свойств. Материал подложки выбирался исходя из разницы показателей преломления ВТО и MgO . Рост осуществлялся методом импульсного лазерного осаждения (PLD). Кристаллическая структура и эпитаксиальные соотношения выращенных пленок контролировались *in-situ* во время роста с помощью дифракции быстрых электронов (RHEED). Для исследования зависимости поляризации слоев ВТО от внешнего электрического поля были выращены тестовые образцы с буферным проводящим слоем SrRuO_3 и нанесенными сверху золотыми контактами. Измерения электрофизических свойств производились по двух-зондовой методике. Полученные результаты позволили исследовать зависимость сегнетоэлектрического эффекта в эпитаксиальных пленках титаната бария от условий роста.

1. G. Sinatkas, T. Christopoulos, O. Tsilipakos, and E. E. Kriezis, Electro-optic modulation in integrated photonics, *J. Appl. Phys.* **130** (2021).
2. J. Winiger et al., PLD Epitaxial Thin - Film BaTiO on MgO – Dielectric and Electro - Optic Properties, *Adv. Mater. Interfaces* **11** (2024).

В.Е. Ремеле (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, каф. МНЭ),
М.В. Кузьмин (к.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

РОЛЬ ДВУМЕРНОГО ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ В МЕХАНИЗМЕ РОСТА СТРАНСКОГО-КРАСТАНОВА: ПЛЕНОЧНАЯ СИСТЕМА Sm-Si(111)

Механизм Странского–Крастанова является одним из наиболее часто наблюдаемых способов роста чужеродных пленок на полупроводниковых подложках. Одной из характерных особенностей этого механизма является наличие двумерного (2D) переходного слоя наносимых на подложку атомов, после заполнения которого начинается образование 3D островковой пленки. Это означает, что в пленочных системах, формирующихся по механизму Странского–Крастанова, открывается возможность управлять морфологией и другими физико-химическими свойствами получаемых пленок при условии, что может быть сформирован переходной слой с заданными свойствами.

В настоящей работе представлены результаты, которые подтверждают рассмотренную выше возможность. В ней была исследована пленочная структура Sm-Si(111) в широкой области покрытий и температур. Для ее диагностики использовался комплекс экспериментальных методов, основным из которых была электронная оже-спектроскопия (ЭОС). Для количественного анализа данных ЭОС была разработана модель, которая позволяет получать информацию о морфологии пленок и геометрических свойствах образующих ее островков.

Установлено, что формирование структур Sm-Si(111) при повышенных температурах (900-1140 К) происходит по механизму, близкому к механизму Странского–Крастанова. Главным отличием от классического случая является то, что после образования смачивающего (переходного) слоя на нем начинается рост 3D кристаллитов дисилицида самария, а не островков чистого редкоземельного металла. С помощью ЭОС и предложенной модели были идентифицированы особенности роста дисилицидных пленок на различных переходных слоях – 2D реконструкциях Sm-Si(111)(5×1) и Sm-Si(111)'√3'. Показано, что переход от первого типа переходного слоя ко второму сопровождается значительным изменением формы островков силицида: их аспектное отношение изменяется в несколько раз. Это означает, что индуцированную атомами Sm реконструкцию '√3' можно рассматривать в качестве интерфактанта для роста пленки силицида самария на поверхности Si(111).

В работе обсуждаются также физические причины, лежащие в основе трансформации формы островков. Показана взаимосвязь наблюдаемого эффекта с атомным строением 2D реконструкций и 3D островков дисилицида в структурах Sm-Si(111).

СТРУКТУРА И СТАБИЛЬНОСТЬ СКЕРМИОНОВ В МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ МЕЖСЛОЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В настоящее время возрастающий интерес к исследованию скирмионов связан с широкой областью применения в спинтронике. Исследование основного состояния решеток магнитных скирмионов является актуальным направлением, так как оно имеет важное значение для разработки новых магнитных материалов с улучшенными свойствами.

В настоящей работе рассмотрена спиновая конфигурация основного состояния многослойных тонких магнитных пленок, учитывающая наличие конкурирующих обменных взаимодействий первых ближайших соседей (NN), взаимодействующих между собой ферромагнитным обменным взаимодействием $J_1 > 0$, следующих ближайших соседей (NNN), взаимодействующих посредством антиферромагнитного обменного взаимодействия величиной $J_2 < 0$ вдоль оси y . Исследовано, как параметр межслойного взаимодействия J_3 влияет на спиновые конфигурации. Гамильтониан исследуемой системы:

$$H = H_m + H_f + H_{DM} + H_{mf},$$

где H_m – гейзенберговский гамильтониан фрустрированной магнитной подсистемы, H_f – гамильтониан диэлектрической пленки, H_{DM} – взаимодействие Дзялошинского–Мория в плоскости магнитной пленки, H_{mf} – гамильтониан межслойного взаимодействия.

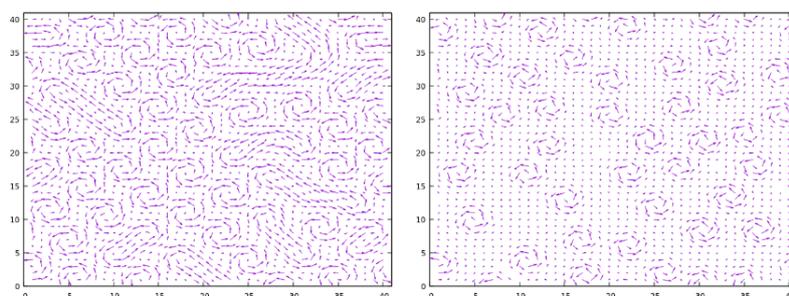


Рис. 1. 2D-конфигурации основного состояния поверхностного слоя пленки с параметрами $J_1 = 1$, $J_2 = -0.4$, $h = 0.5$, $J_3 = 0.1$ (слева) и $J_3 = 1.3$ (справа).

При влиянии параметра межслойного взаимодействия на решетку скирмионы становятся стабильными и периодичными до определенного порога; когда значение $J_3 > 0.6$, наблюдается постепенное нарушение периодичности решетки, происходит фазовый переход. Также были исследованы графики зависимостей намагниченности от температуры и спектры энергии.

Работа выполнена в рамках государственного задания (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024, тема № 324-21).

1. E.H. Sahbi, I.F. Sharafullin, H. T. Diep, H. Garbouj, M. Debbichi, M. Said, *Magnetism and Magnetic Materials*. **563** 169920 (2022).

Н.Д. Якушова (студ., 1 курс маг., ПГУ),
И.А. Филиппов (асп., 3 год, ПГУ),
А.А. Карманов (к.ф.-м.н., доц., каф. НиМЭ, ПГУ),
И.А. Пронин (д.т.н., зав. каф., НиМЭ, ПГУ)

НАНОСТРУКТУРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ZnO, СОДОПИРОВАННОГО Cu и Al

Интенсивные исследования широкозонных металлооксидов, таких как ZnO, TiO₂, SnO₂, в последние десятилетия обеспечили обширную сферу их практического применения, включая создание устройств нано- и микроэлектроники с улучшенными функциональными характеристиками [1], таких как тонкопленочные транзисторы и УФ-фотодетекторы. Также масштабной сферой практического использования данных материалов является газовая сенсорика и фотокатализ [2]. Допирование широкозонных металлооксидов различными металлами – известный подход для модификации их электрофизических, оптических, магнитных и других свойств. Однако большинство работ сосредоточено на их модификации только одним металлом, в то время как исследования по содопированию данных материалов немногочисленны и не систематизированы. При этом в ряде работ показано, что содопирование позволяет получать наноматериалы, морфоструктура которых определяется содержанием содопантов [3].

Целью настоящей работы является развитие методов и подходов наноструктурной инженерии, обеспечивающих формирование наноматериалов на основе ZnO:Al:Cu с заданными структурными параметрами. Синтез содопированного алюминием и медью оксида цинка в виде тонких пленок осуществлялся на кремниевых подложках в рамках адаптированной для целей наноструктурной инженерии золь-гель технологии. Атомное содержание Al и Cu варьировали от 1 до 5 ат.% таким образом, чтобы суммарная концентрация содопантов составляла 6 ат.%. Исследование образцов методом растровой электронной микроскопии и рентгеновской дифракцией показало, что вариация концентрации содопантов приводит к существенному изменению их морфоструктуры. Установлено, что содопирование ZnO 4 ат.% Al и 2 ат.% Cu приводит к принципиально новому типу морфоструктуры материала, для которого характерно наличие переплетенных ветвей из допированного алюминием оксида цинка размером 0.5–2 мкм с кристаллической решеткой типа вюрцит и оксида меди (II) в виде наночастиц квазисферической формы размером 50 нм и менее с кристаллической решеткой типа тенорит, для которого наблюдаются эффекты размерного квантования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01280, <https://rscf.ru/project/23-79-01280/>

1. Rodriguez-Davila R. A. et al., *Microel. Eng.*, **279**, 112063 (2023).
2. Proinin I.A. et al., *Materials*, **16(14)**, 5030 (2023).
3. Bu I. Y.-Y., *Ceram. Inter.*, **41(3)**, 4042 (2014).

Я.Е. Майдэбура (асп., 4 год, ИФП СО РАН),
В.Г. Мансуров, Т.В. Малин, А.Н. Смирнов, Б. Пех,
К.С. Журавлев (д.ф.-м.н., в.н.с., ИФП СО РАН)

СТРУКТУРА И ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaN НА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФЕНОПОДОБНОЙ СТРУКТУРЫ g-SiN

Уникальные свойства квантовых точек (КТ) GaN, такие как большая энергия связи и сила осциллятора экситона, большая эффективная масса электронов и дырок, вызывают значительный интерес со стороны фундаментальной и прикладной наук. На основе КТ GaN было продемонстрировано создание светодиодов, однофотонных излучателей, солнечных элементов, одноэлектронных транзисторов и спиновых затворов. Фундаментальной проблемой широкого применения КТ GaN является отсутствие относительно простого способа контролируемого формирования монодисперсных КТ GaN.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование структуры и механизмов формирования нанокристаллов (НК) GaN методом капельной эпитаксии (КЭ) на поверхности графеноподобного слоя SiN (g-SiN). Из анализа морфологии поверхности следует, что на поверхности слоя g-SiN происходит формирование НК GaN низкой плотности ($5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$) с узким распределением по размерам ($\sigma = 13\%$). При увеличении количества нанесенного Ga в 10 раз плотность НК практически не меняется, тогда как размер НК меняется значительно. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии отдельных НК, последние лежат непосредственно на поверхности g-SiN и практически свободны от упругих напряжений.

Как следует из картин дифракции быстрых электронов, в объеме НК одновременно формируются 3 фазы: сфалерит (ZB) с плоскостью (111), политип 6Н и вюрцит (WZ) с плоскостью (10-10). Политипизм в НК подтверждается данными микро-фотолюминесценции. Формирование фаз ZB и WZ было объяснено в рамках классической теории нуклеации, тогда как политип 6Н зарождается на границе этих фаз. Согласно литературным данным, политипизм при росте нитридных наноструктур методом пар-жидкость-кристалл наблюдаться не должен, что вызвано соотношением поверхностных энергий и энергии когезии структур WZ (0001) и ZB (111). В нашем случае, по-видимому, формирование структуры WZ с полярной плоскостью (0001) из-за отсутствия механизмов стабилизации полярной поверхности подавлено, и выбор у системы при зародышеобразовании в объеме капли сводится либо к ZB (111), либо к WZ (10-10). При рассмотрении фазы ZB (111) и WZ (10-10), расчет в рамках классической теории нуклеации показывает возможность одновременного формирования в объеме НК указанных фаз в широком диапазоне пересыщений.

М.С. Ружеви́ч (асп., 4 год, Университет ИТМО, факультет ИПСПД),
К.Д. Мынбаев (д.ф.-м.н., Университет ИТМО, факультет ИПСПД),
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
И.В. Чуманов (асп., 1 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
О.С. Комков (д.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
В.С. Варавин (к.ф.-м.н., ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН),
М.В. Якушев (д.ф.-м.н., ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН)

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ СО СТРАВЛЕННЫМ ВАРИЗОННЫМ СЛОЕМ

Твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) состава $x \approx 0.3$ применяются для создания инфракрасных фотоприемников, работающих в средневолновом диапазоне (длины волн $\lambda = 3\text{--}5$ мкм). Подобные фотоприемники востребованы в таких областях, как промышленность, экология и медицина. При выращивании пленок КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на поверхности активной области выращивается тонкий слой (до 500 нм) переменного состава, предназначенный для локализации носителей заряда в объеме активной области и уменьшения темпа поверхностной рекомбинации. Вклад этого слоя в оптические свойства пленок, однако, подробно до сих пор не исследовался.

В работе будут представлены результаты исследования фотолюминесценции (ФЛ) и фотоотражения (ФО) эпитаксиальных пленок КРТ состава $x \approx 0.3$. Экспериментальные исследования проведены в широком интервале температур $T = 11\text{--}300$ К на эпитаксиальных пленках, легированных мышьяком As и нелегированных, после различных видов отжига.

По результатам исследований показано, что варизонный слой на поверхности эпитаксиальных пленок оказывает влияние на оптические свойства образцов. С помощью низкотемпературной ФЛ установлено уменьшение смещения пика люминесценции после отжига в область больших энергий для образцов со стравленным варизонным слоем. При измерении ФО наблюдалось смещение пиков отражения в высокоэнергетическую сторону для образцов, легированных мышьяком, после активационного отжига. Для нелегированных образцов после отжигов, уменьшающих концентрацию точечных дефектов, наблюдалось кратное увеличение интенсивности пиков ФО. Данные изменения в спектрах ФЛ и ФО до и после удаления варизонного слоя показывают, что он вносит вклад в общий оптический сигнал при измерениях. Помимо этого, в случае отожженных образцов возможна как диффузия атомов из поверхностного слоя, которая влечет изменение состава активной области, так и трансляция дефектной структуры варизонного слоя в объем активной области. Исследование данных особенностей может позволить избежать непреднамеренного изменения параметров активной области в эпитаксиальных пленках с поверхностным варизонным слоем.

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)

УДК 538.9

И.А. Бетке (студ., 3 курс бак., ФФ НГУ; лаборант, ИФП СО РАН),
И.С. Стрыгин (к.ф.-м.н., ИФП СО РАН), А.А. Быков (д.ф.-м.н., ИФП СО РАН)

ВЛИЯНИЕ ПОДСВЕТКИ НА ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЕ ВЫСОКОПОДВИЖНОГО ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА

На протяжении последних десятилетий высокоподвижные двумерные электронные системы на основе селективно-легированных гетероструктур GaAs/AlGaAs являются платформой для исследований в области физики конденсированного состояния. Основным фактором интереса к этим системам было и остается непрерывное улучшение качества гетероструктур GaAs/AlGaAs, обусловленное оптимизацией их дизайна и прогрессом в технологии выращивания [1]. Одной из разновидностей реализации 2D систем является гетероструктура GaAs/AlAs [2]. Высокая подвижность (μ) в такой структуре достигается не только пространственным разделением областей легирования и транспорта Γ -электронов в квантовой яме GaAs, но ещё и экранировкой рассеивающего потенциала легирующей примеси X-электронами, локализованными в короткопериодных сверхрешеточных барьерах AlAs/GaAs [3].

Общепринятой характеристикой «качества» 2D электронного газа является величина $\mu \sim \tau_t$, где τ_t – транспортное время рассеяния. Рассеяние электронов приводит не только к уменьшению μ , но и к квантово-механическому уширению одночастичных электронных состояний $\Gamma = \hbar/2\tau_q$, где τ_q – квантовое время жизни. В общем случае $\tau_q \neq \tau_t$. Величина τ_t определяется в основном рассеянием на большие углы, а τ_q – на все углы. Величина τ_q такая же важная характеристика «качества» 2D электронного газа, как τ_t . В высокоподвижных структурах τ_q определяется в основном малоугловым рассеянием. В таких системах должно наблюдаться квантовое положительное магнетосопротивление (ПМС) [4]. Оно было обнаружено в гетероструктуре GaAs/AlAs, что открыло дополнительную возможность исследования процессов электронного рассеяния в 2D системах [5]. В настоящей работе изучено влияние подсветки красным светодиодом на ПМС 2D электронного газа в селективно-легированной гетероструктуре GaAs/AlAs при температуре $T = 4.2$ К в магнитных полях $B < 2$ Тл. Обнаружено значительное увеличение ПМС после подсветки. Показано, что увеличение ПМС в исследуемой высокоподвижной 2D электронной системе после подсветки обусловлено увеличением квантового времени жизни.

1. Yoon Jang Chung, A. Gupta, K. W. Baldwin et al., *Phys. Rev. B* **106**, 075134 (2022).
2. K. J. Friedland, R. Hey, H. Kostial et al., *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4616 (1996).
3. M. Sammon, M. A. Zudov, and B. I. Shklovskii, *Phys. Rev. Materials* **2**, 064604 (2018).
4. M. G. Vavilov and I. L. Aleiner, *Phys. Rev. B* **69**, 035303 (2004).
5. S. Dietrich, S. Vitkalov, D. V. Dmitriev, and A. A. Bykov, *Phys. Rev. B* **85**, 115312 (2012).

Е.В. Доморацкий (студ., 6 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
М.В. Захарченко (асп., 4 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РЕЗОНАНСНОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

В последние годы существенно возрос интерес к созданию приборов наноэлектроники и спинтроники, использующих эффекты резонансного туннелирования носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах [1]. В большинстве опубликованных работ анализ резонансного туннелирования проводится в рамках метода эффективной массы или метода плавных огибающих функций с учетом одной нижней энергетической зоны [2]. В настоящее время отсутствует строгая теория данных явлений, учитывающая микроскопическое (атомарное) строение соответствующих потенциальных барьеров, а также особенности зонной структуры исходных материалов. К их числу можно отнести короткодействующие интерфейсные поправки на гетерограницах [3] и отклонение дисперсионных зависимостей от параболического закона. Их учет при решении задачи о туннелировании позволит точнее определить спектр резонансных энергий, при которых осуществляется перенос носителей заряда через гетерограницу.

В настоящей работе на основе точного решения уравнения Шрёдингера методом псевдопотенциала развивается теория резонансного туннелирования для многобарьерных гетероструктур с учетом всех особенностей зонной структуры исходных материалов. В рамках рассматриваемого подхода гамильтониан системы формируется из гамильтониана опорного кристалла и слагаемого, отвечающего за изменение периодического кристаллического потенциала в области потенциальных барьеров. При этом вблизи границ рассматриваемой области вводится чисто мнимый плавный потенциал для обеспечения затухания волновой функции носителей заряда [4]. Геометрия гетероструктуры определяется характеристической функцией, задающей форму и число барьеров. Анализ проводится в рамках биортогонального формализма методом функций Грина в \mathbf{k} -представлении, что позволяет анализировать непрерывный энергетический спектр коэффициента туннелирования носителей заряда через гетеробарьеры [5]. Показано, что рассматриваемая задача сводится к решению системы алгебраических уравнений, параметрически зависящих от энергии носителей заряда. Анализируется влияние короткодействующих интерфейсных поправок, а также эффекты непараболичности энергетических зон.

1. M. Asada, S. Suzuki, *Sensors*, **21** (4), 1384 (2021).
2. Ч.С. Ким, А.М. Сатанин, В.Б. Штенберг, *ФТП*, **36** (5), 569 (2002).
3. Г.Ф. Глинский, М.С. Миронова, *ФТП*, **48** (10), 1359 (2104).
4. М.В. Захарченко, Г.Ф. Глинский, *ЖТФ*, **93** (10), 1396 (2023).
5. E.V. Domoratsky, M.V. Zakharchenko, G.F. Glinskii, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, **17** (1.1), 55 (2024).

Т.Э. Зедоми (студ., 2 курс маг., СПбАУ им. Ж.И. Алферова),
В.П. Кочерешко (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Д.Д. Белова, Л.В. Котова, А.С. Гуревич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ZnSe/BeTe, НЕ ИМЕЮЩИМИ ОБЩЕГО АТОМА НА ИНТЕРФЕЙСАХ, В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Границы раздела в полупроводниковых гетероструктурах играют важную роль в определении их свойств. В интерфейсах могут существовать особые состояния, которые значительно влияют на транспортные и оптические свойства. Так нарушение периодичности на гетероинтерфейсе приводит к образованию таммовских состояний, которые влияют на проводимость и фотонные характеристики материала. Однако, помимо таммовских состояний, существуют и другие интерфейсные состояния, связанные уже с изменением химического состава самих интерфейсов, они более специфичны и зависят от конкретных условий роста и состава материалов. Такие состояния могут возникать, в частности, в гетероструктурах, где отсутствует общий атом. Поэтому изменения в химическом составе интерфейсов могут, например, влиять на процессы рекомбинации носителей заряда, что имеет большое значение для оптических характеристик. Исследование и оптимизация свойств интерфейсов становится важной задачей для повышения эффективности и управления характеристиками полупроводниковых устройств.

В данной работе изучались спектры фотолюминесценции (ФЛ) в гетероструктурах типа-II ZnSe/BeTe, имеющих структуру без общего атома на границе раздела (интерфейсе). Такие структуры обеспечивают высокую степень разделения пространственного заряда, что делает их перспективными для создания устройств с высокой эффективностью. Эксперименты проводились в магнитных полях до 45 Тл.

В спектрах ФЛ были выявлены следующие особенности: наблюдались линии, связанные с непрямыми оптическими переходами, то есть с переходами между состояниями, локализованными в разных слоях гетероструктуры; также в спектрах ФЛ были обнаружены линии, связанные с переходами с участием состояний, локализованных на границах раздела между слоями ZnSe и BeTe. Кроме того, установлено, что при возрастании интенсивности магнитного поля происходит перераспределение интенсивностей линий ФЛ не прямых переходов (IT) и интерфейсной рекомбинации (IntR) в пользу не прямых переходов. Немонотонная зависимость интенсивности ФЛ из интерфейсных состояний возникает из-за конкуренции механизмов захвата и рекомбинации ввиду различного характера их зависимости от магнитного поля. Результаты расчета зависимости перераспределения интенсивностей линий ФЛ не прямых переходов (IT) и интерфейсной рекомбинации (IntR) в зависимости от величины магнитного поля посредством решения кинетических уравнений согласуются с полученными экспериментальными данными.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ФОНОНОВ НА РАЗОГРЕВ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА НА ГЕТЕРОИНТЕРФЕЙСЕ GaN/AlGaN

Нитрид галлия и гетероструктуры на его основе являются перспективными для полупроводниковой оптоэлектроники. Благодаря комбинации уникальных свойств на основе GaN можно создавать оптоэлектронные приборы не только в видимом, но и в терагерцовом (ТГц) спектральных диапазонах. Для разработки таких приборов важно исследовать процессы разогрева носителей заряда. Так в работе [1] исследовалось ТГц излучение двумерных электронов, разогретых электрическим полем, в гетероструктуре GaN/AlGaN. В цитируемой работе при исследовании разогрева электронов рассматривалось рассеяние на объемных продольных оптических фононных модах. Однако, согласно модели диэлектрического континуума, в одиночном гетеропереходе правильнее рассматривать интерфейсные фононные моды и фононные моды полупространства. Цель настоящей работы – теоретическое исследование влияния интерфейсных мод и мод полупространства на разогрев двумерного электронного газа на гетеропереходе GaN/AlGaN.

Объектом исследования являлась треугольная квантовая яма (КЯ), сформированная на гетероинтерфейсе GaN/AlGaN. В расчетах использовалась двумерная концентрация электронов $1.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Температура кристаллической решетки T_0 принималась равной 4.2 К. В расчетах считалось, что КЯ содержит один уровень размерного квантования. В качестве неравновесной функции распределения электронов использовалась функция Ферми с электронной температурой T_e ; неравновесная функция распределения фононов имела следующий вид: $N_q = N_q^0 + (dN_q/dt)\tau_q$, где N_q^0 – равновесная функция распределения фононов, dN_q/dt – скорость изменения числа фононов, τ_q – время жизни фонона. На гетероинтерфейсе GaN/AlGaN существуют три различные интерфейсные оптические фононные моды. Полагалось, что частоты как интерфейсных мод, так и мод полупространства не зависят от волнового вектора фонона. Были рассчитаны скорости потери энергии dE/dt двумерных электронов в зависимости от электронной температуры при рассеянии на интерфейсных фононах и фононах полупространства, при этом рассеяние на модах полупространства вносило заметный вклад. Расчет dE/dt проводился с учетом эффектов накопления фононов и экранирования поляризационного потенциала свободными двумерными электронами. Зависимость электронной температуры от электрического поля находилась с помощью уравнения баланса мощности и экспериментальной вольтамперной характеристики из работы [1]. Расчет спектра терагерцового излучения горячих двумерных электронов был выполнен для нескольких значений электрических полей.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00036).

1. V.A. Shalygin et al. J. Appl. Phys., **109** (7), 073108 (2011).

Е.Д. Поленок (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ВШФФИ),
В.В. Чалдышев (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

БРЭГГОВСКИЙ РЕЗОНАНС В СЛОЯХ GaAs, ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННЫХ Bi

Локализованный поверхностный плазмонный резонанс позволяет сконцентрировать электромагнитное поле на субволновых масштабах и усилить взаимодействие света с веществом. В полупроводниках это явление можно реализовать, если создать систему плазмонных наночастиц в полупроводниковой матрице. Для дополнительного усиления эффекта систему можно сделать периодической, так чтобы в области плазмонного резонанса реализовывался еще и брэгговский резонанс.

В данном докладе мы сообщаем о первой успешной реализации плазмонной брэгговской решетки, состоящей из 24 слоев наночастиц Bi , сформированных в матрице GaAs.

Исследованные образцы получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Были проведены электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования, в которых определены структурные и геометрические параметры метаматериала. В частности, характерный размер наночастиц составил 10 нм.

На рис.1. представлены экспериментальные (а) и расчетные (б) спектры отражения света, падающего под различными углами. Расчёт выполнен методом матриц переноса по теории Ми. В расчёте использовалась модель Адачи [1] и данные статьи Ушанова и др. [2].

Спектры отражения демонстрируют брэгговские осцилляции в спектральной области 870–1100 нм. Со стороны коротких длин волн эта область ограничена окном прозрачности матрицы GaAs, определяемой величиной E_g . В длинноволновой области затухание осцилляций на длинах волн, больших 1100 нм, связано с дисперсией диэлектрической функции Bi .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20012, <https://rscf.ru/project/24-22-20012/>.

1. Adachi S., J.Appl.Phys.**58**, R1-R29(1985).
2. Ushanov V. I. et al., Nanomaterials **14**, 109(2024).

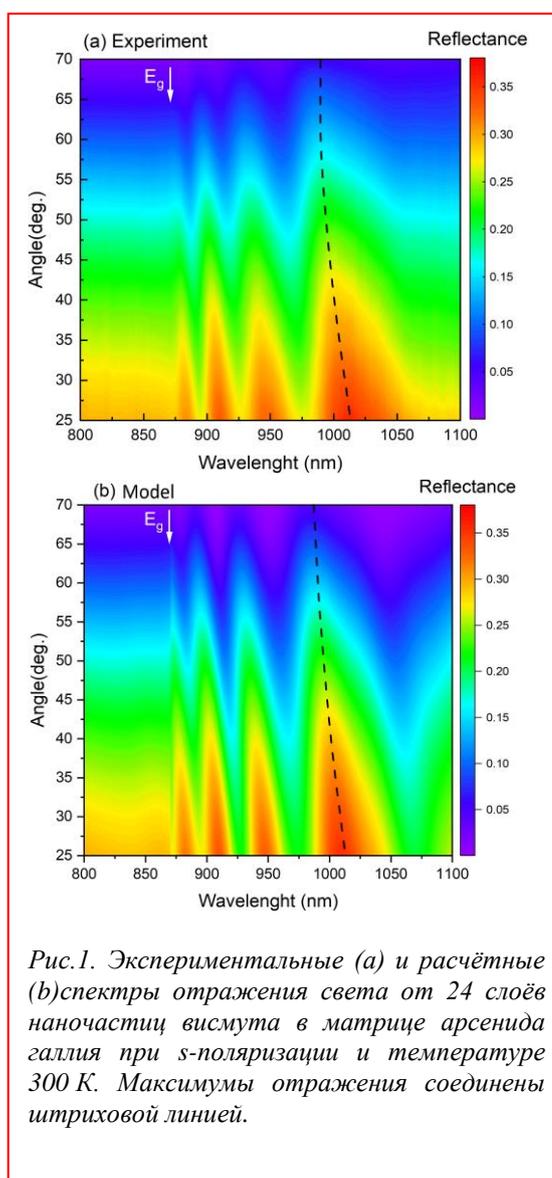


Рис.1. Экспериментальные (а) и расчётные (б) спектры отражения света от 24 слоев наночастиц висмута в матрице арсенида галлия при s -поляризации и температуре 300 К. Максимумы отражения соединены штриховой линией.

А.М. Шенцев (студ., 1 курс маг., МФТИ, ПТФ),
М.М. Глазов (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭКСИТОНОВ В МУАРОВЫХ СВЕРХРЕШЁТКАХ

В ван-дер-ваальсовых гетероструктурах на основе дихалькогенидов переходных металлов возникает эффект муара – появление почти периодического потенциала, действующего на носители заряда и экситоны, обусловленного рассогласованием постоянных решеток слоев и их разворотом друг относительно друга. Такие муаровые структуры привлекают большой интерес исследователей [1]. Ранее считалось, что в таких сверхрешетках экситоны локализованы из-за достаточно высоких и широких барьеров, которые затрудняют их квантовомеханическое туннелирование.

В работе предложен механизм делокализации оптически активных экситонов за счет их взаимодействия с электромагнитным полем, индуцированным в результате виртуальных процессов генерации-рекомбинации экситонов в узлах муаровой сверхрешетки. Этот механизм аналогичен ферстеровскому переносу энергии и может быть описан как результат диполь-дипольного взаимодействия. Предложена простейшая модель светоэкситонного взаимодействия, в которой экситоны рассматриваются как точечные диполи, локализованные в узлах муаровой сверхрешетки. На примере треугольной решетки показано, что имеются две ветви в энергетическом спектре экситонов. В пределе малых по сравнению с обратным периодом решетки волновых векторов одна из них – «поперечная» (микроскопический дипольный момент экситона ортогонален его волновому вектору) – является бездисперсионной, а вторая – «продольная» – обладает линейной дисперсией.

На основании полученного спектра был рассчитан коэффициент диффузии D экситонов как для квазиклассического режима их распространения, когда экситоны слабо рассеиваются на статическом беспорядке и фонах, так и для прыжкового режима, реализуемого в условиях достаточно сильного беспорядка. В случае слабого беспорядка $D \sim 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ при комнатной температуре и возрастает с понижением температуры. В случае транспорта экситонов с переменной длиной прыжка [2] предсказан степенной закон зависимости коэффициента диффузии от температуры. Этот результат – следствие дальнедействующего диполь-дипольного характера переноса экситонов между узлами [3].

1. Yao Xiao, Jinglu Liu, and Lei Fu. Moiré is more: Access to new properties of two-dimensional layered materials. *Matter*, 3(4) 1142–1161 (2020).
2. Б.И. Шкловский, А.М. Эфрос. «Электронные свойства легированных полупроводников». М. Наука (1979).
3. А. М. Shentsev, М. М. Glazov, Electromagnetic field assisted exciton diffusion in moiré superlattices, препринт arXiv:2409.04284 (2024).

Д.С. Артеев (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
А.В. Сахаров (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
А.Е. Николаев (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Е.Е. Заварин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Е.В. Никитина (к.ф.-м.н., в.н.с., СПбАУ; с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
А.Ф. Цацульников (д.ф.-м.н., и.о. директора, НТЦ микроэлектроники РАН)

СЛОЕВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУР С БАРЬЕРАМИ ПОВЫШЕННОГО СОСТАВА

Полевые транзисторы на основе GaN очень интересны для высокомоощных и высокочастотных применений. Как правило, для их изготовления используются гетероструктуры AlGaN/GaN с толщиной барьерного слоя AlGaN ~30 нм и мольной долей алюминия не превышающей 25–30% и их типичное слоевое сопротивление составляет $R_S \sim 300$ Ом/кв и выше. Увеличение мольной доли алюминия позволяет повысить концентрацию двумерного электронного газа (ДЭГ) в канале и, теоретически, понизить слоевое сопротивление. Однако на практике это зачастую может сопровождаться сильным падением подвижности ДЭГ при увеличении его концентрации [1] и приводить даже не к снижению, а к увеличению слоевого сопротивления. Данное падение подвижности связано как повышением темпа рассеяния на акустических и оптических фононах [2], так и с ухудшением качества материала и увеличением шероховатости интерфейса [3] при толщинах AlGaN, близких к критическим. Поэтому можно предположить существование оптимального с точки зрения минимального слоевого сопротивления состава барьерного слоя AlGaN.

В данной работе методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на кремниевых подложках нами была выращена серия структур AlGaN/GaN с немного уменьшенной толщиной барьерного слоя в диапазоне составов 28–44%. С помощью оптимизации состава AlGaN и условий роста удалось добиться слоевого сопротивления < 240 Ом/кв., что, насколько нам известно, является одним из самых низких значений для подобного типа структур, выращенных на кремниевых подложках [4, 5].

1. D. S. Arteev et al., *St. Petersburg State Polytechnical University J. Phys. Math.* 16.1.1 (2023): 380-384.
2. M. N. Gurusinge et al., *Phys. Rev. B Condens. Matter* **72** (2005).
3. J.-F. Zhang et al. *Chin. Phys. B* **17** (2008).
4. Y. Yan et al., *Micromachines* **15** (2024).
5. C. Kai et al., *J. Cryst. Growth* **298** (2007).

М.В. Бахметьев (к.ф.-м.н., с.н.с., МФТИ),
Э.О. Чиглинец (асп., 3 год, МФТИ, ЛФИ),
Е.Ю. Барулина (PhD, н.с., МФТИ),
А.А. Катанин (д.ф.-м.н., г.н.с., МФТИ),
А.И. Чернов (д.ф.-м.н., в.н.с. - зав. лаб., МФТИ)

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ТУННЕЛЬНОГО МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЯ В ОБЪЕМНОМ МАГНИТНОМ ИЗОЛЯТОРЕ CrCl₃

Двумерные электронные и спинтронные устройства в настоящее время демонстрируют множество привлекательных свойств. Одним из свойств является магнитный туннельный переход, тип базового бистабильного спинтронного устройства, которое может применяться в датчиках и логике. В частности, структуры без барьерного слоя с двумя и более слоями или объемные структуры 2D-полупроводников могут обеспечить магнетосопротивление более 1000% [1]. Недавно был предложен новый тип спин-ограниченного оптоэлектронного устройства, разработанного с использованием 2D ферромагнитных полупроводниковых гетероструктур (FMS), состоящих из CrCl₃ и CrBr₃ [2]. Устройство основано на модели перехода между межслойным магнитным порядком и спин-поляризованной зонной структурой и может достигать обратимого переключения посредством изменения намагниченности. Это открывает новые возможности для приложений на основе двумерных гетероструктур и позволяет реализовывать сверхкомпактные спинтронные устройства.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование фазового перехода и туннельного магнетосопротивления в структуре hBN/Graphene/CrCl₃/Graphene/hBN. Температура перехода из парамагнитного в антиферромагнитное состояние при нулевом магнитном поле была зарегистрирована при 19 К, что характерно для CrCl₃. С ростом внешнего магнитного поля температура перехода увеличивается и при $H = 9$ Т становится равной 22.4 К. С помощью двумерной полулогарифмической зависимости $dI/dT(T)$ была построена фазовая диаграмма объемного CrCl₃, окруженного слоями графена, в котором идентифицируются отдельный переход между фазой антиферромагнетика, полностью спин-поляризованной фазой и парамагнитной фазой. Кроме того, было зарегистрировано туннельное магнетосопротивление с увеличением магнитного поля (1500% при температуре 2 К).

Работа поддержана Минобрнауки России, Соглашение 075-15-2024-680 в рамках создания образца и проектом РНФ 24-12-00186 в части исследования туннельного магнетосопротивления.

1. X. Cai et al., *Nano Lett.*, **19**, 3993 (2019).
2. Y. Guo et al., *Mater. Horiz.*, **8**, 1323 (2021).

ГЕНЕРАЦИЯ ДВУМЕРНЫХ ПЛАЗМОННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В СВЕТОДИОДНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InGaN/AlGaN/GaN С РЕШЕТЧАТЫМ ЗАТВОРОМ

В последнее время интенсивно изучается плазмонное детектирование терагерцевого излучения ($\sim 10^{12}$ Гц) в низкоразмерных электронных системах [1]. Поскольку длина волны двумерного 2Д-плазмона на три порядка меньше, чем длина волны терагерцевого излучения, необходима структура, связывающая электрическое поле терагерцевого излучения с электрическим полем 2Д-плазмона.

Объектами исследований являются типичные светодиодные гетероструктуры с тремя и пятью КЯ In_xGa_{1-x}N/GaN в активной области. Для гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN на подложке Al₂O₃ наращивался затравочный слой GaN толщиной 5 мкм. Затем формировалась буферная сглаживающая сверхрешётка InGaN/GaN. Активная область гетероструктур состоит из трех и пяти квантовых ям (КЯ) In_xGa_{1-x}N/GaN. Следующим формировался слой AlGaN. В качестве структуры, связывающей электрическое поле плазмона с электрическим полем терагерцевого излучения, использовался решетчатый затвор, состоящий из Ni/Au контактов с периодом 500 нм, выращенный на поверхности гетероструктуры AlGaN/GaN.

Источником излучения является Ti:сапфировый лазер на длине волны 800 нм, со средней выходной мощностью излучения 57 мВт и с частотой следования импульсов равной 60 МГц. Для генерации и детектирования терагерцевого излучения использовались две фотопроводящие антенны (ФП) из низкотемпературного GaN. Одна из них (ФП1) применялась в качестве детектора терагерцевых импульсов. Другая (ФП2) использовалась для преобразования подаваемых на нее фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцевые электромагнитные волны. Генерация и детектирование 2Д-плазмонных осцилляций осуществлялись методом терагерцевой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS). Временные формы терагерцевых импульсов были получены в геометрии на прохождение. При этом электрическое поле плазмона локализуется под металлическими полосами решетчатого затвора, а сам плазмон возбуждается в режиме «сильной связи».

Быстрое преобразование Фурье временных форм позволило получить частотные спектры мощности и фазового сдвига терагерцевого излучения, интерпретация которых дала возможность оценить время релаксации квазиимпульса ($\sim 10^{-12}$ с), подвижность ($\mu = 4 \cdot 10^3$ см²/В·с) и эффективную массу ($m^* = 0.21m_0$) основных носителей заряда в исследованных гетероструктурах. С помощью серии частотных спектров мощности и фазового сдвига терагерцевого излучения были получены температурные зависимости электронной эффективной массы и времени релаксации квазиимпульса в КЯ In_xGa_{1-x}N/GaN. Значение подвижности, полученное методом THz-TDS, хорошо согласуется с данными холловских измерений.

1. D. Pashnev, T. Kaplas, V.V. Korotyeyev, et al. // Applied Physics Letters **117**, 051105 (2020).

М.В. Захарченко (асп., 4 год, СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, каф. МНЭ),
 Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, каф. МНЭ)

ДИСПЕРСИЯ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Оптический отклик полупроводниковых низкоразмерных структур в последние годы активно исследуется в связи с возможностью создания на их основе разнообразных устройств оптической электроники [1]. Характерной особенностью подобных систем является существенная перестройка энергетических спектров фотонов и экситонов, возникающая при учёте их взаимодействия. В результате этого взаимодействия возникает новый тип элементарных возбуждений, которые принято называть экситонными поляритонами. Кроме того, изучение подобных структур открывает перспективу для фундаментальных исследований, связанных с явлениями поляритонной бозе-конденсации и сверхтекучести [2]. Особенный интерес представляют исследования экситонных поляритонов в двумерных полупроводниковых структурах, например, таких как монослои дихалькогенидов переходных металлов. В двумерных полупроводниках величина энергии связи экситона существенно превышает соответствующие значения в объёмных материалах, что позволяет экспериментально исследовать их оптические свойства при комнатных температурах. При этом появляется возможность управлять модовой структурой в таких системах с помощью внешних полей, изменяющих их диэлектрические и магнитные характеристики.

В настоящей работе предлагается наиболее общий подход к исследованию энергетического спектра экситонных поляритонов в структурах на основе двумерных полупроводников. Развиваемый математический подход основывается на точных уравнениях для функций Грина взаимодействующих фотонов и экситонов в рамках функциональных методов квантовой теории поля [3]

$$D = D_0 + D_0 \Gamma_0 K_0 \Gamma_0 D,$$

$$K = K_0 + K_0 \Gamma_0 D_0 \Gamma_0 K.$$

Здесь D и K – точные функции Грина фотонов и экситонов, Γ_0 – вершинная функция, D_0 и K_0 – соответствующие функции Грина фотонов и механических экситонов до учёта взаимодействия. Полюса точных функций Грина определяют спектр поляритонов в исследуемой системе. Показано, что данные уравнения эквивалентны задаче на поиск собственных значений, решение которой позволяет рассчитать дисперсию экситонных поляритонов. Представленный общий подход позволяет исследовать системы с произвольной анизотропией диэлектрической и магнитной проницаемостей и нетривиальной геометрией гетероинтерфейсов.

1. S. Kim. Et. al. *Phys. Rev. X* **6**, 011026 (2016).
2. L. Zhang et. al., *Nature Communications* **9**, 713 (2018).
3. G.F. Glinskii, Z.I. Koinov, *Theor. Math. Phys.* **70**, 252 (1987).

А.А. Иванов (асп., 3 год, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
В.В. Чалдышев (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

РЕЗОНАНСНЫЕ БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ ИЗ СДВОЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ InGaN В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СВЕРХЪЯЧЕЙКЕ

В резонансных брэгговских структурах (РБС) электромагнитное связывание индивидуальных экситонов в квантовых ямах (КЯ) приводит к формированию сверхизлучающей оптической моды [1]. Создание резонансных брэгговских структур на основе GaN позволяет наблюдать экситон-поляритонный резонанс при комнатной температуре [2], что делает такие структуры привлекательными для применения в оптических и оптоэлектронных приборах. К сожалению, РБС с большим числом периодов критически чувствительны к отклонениям от строгой периодичности последовательности КЯ из-за трансформации одиночной сверхизлучающей моды в многомодовый спектр [3]. Создание РБС с двумя близко расположенными КЯ в периодической сверхъячейке, теоретически предложенное в [4], обеспечивает увеличение радиационного затухания квазидвумерного экситона в ~ 2 раза по сравнению с РБС из одиночных КЯ. Такой подход может помочь избежать нежелательной трансформации сверхизлучающей моды в РБС.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование формирования сверхизлучательной оптической моды в спектрах отражения от периодических систем из 30 и 60 сдвоенных КЯ InGaN в периодической сверхъячейке, разделенных туннельно-непрозрачными барьерами GaN, при комнатной температуре. Исследуемые РБС были выращены с использованием метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений на сапфировых подложках (0001). Моделирование на основе метода матриц переноса [5] позволило определить параметры экситонов в сдвоенных КЯ InGaN.

Мы показываем, что формирование сверхизлучающей моды в РБС со сдвоенными КЯ InGaN/GaN приводит к существенному увеличению оптического отражения при комнатной температуре. Также экспериментально подтверждаем, что применение сложной сверхъячейки в РБС с большим числом периодов (от 60 и выше) позволяет избежать переключения в многомодовый режим, вызываемого отклонениями толщин слоев от строгой периодичности. Кроме того, реализация структур со сдвоенными КЯ InGaN приводит к росту параметра радиационного затухания экситона до 0.30 ± 0.02 мэВ. Данный факт обусловлен более низким значением встроенного электрического поля в КЯ InGaN и более высоким значением в барьерах GaN по сравнению с РБС из одиночных КЯ InGaN.

1. Е.Л. Ивченко и др., *ФТТ*, **36**, 2118 (1994).
2. V.V. Chaldyshev et al., *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 251103 (2011).
3. А.А. Ivanov et al., *Appl. Phys. Lett.*, **121**, 041101 (2022).
4. E.L. Ivchenko et al., *Phys. Rev. B* **70**, 195106 (2004).
5. А.А. Иванов и др., *ФТП*, **55**, 733 (2021).

И.Э. Калантаевский (асп., 1 год, НИУ ИТМО, ФТМФ),
М.Д. Тюгаев (PhD student, FSU Jena),
А.И. Чернов (д.ф.-м.н., в.н.с., зав. лаб., МФТИ),
В.А. Кравцов (PhD, в.н.с., НИУ ИТМО, ФТМФ)

ЭКСИТОН-ФОТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследование экситон-фотонных взаимодействий в двумерных и квантоворазмерных структурах, сопряженных с магнетиками, является одной из ключевых тем в области оптоэлектроники и спинтроники. Особый интерес вызывает возможность использования экситонных состояний для управления светом и спином в оптических резонаторах на основе двумерных Ван-дер-Ваальсовых материалов [1]. Взаимодействие свет–вещество в таких структурах определяет многие свойства материалов, включая их оптический отклик, когерентную динамику и скорость релаксации возбужденных состояний.

Магнитные материалы обладают уникальными свойствами, что делает их перспективными для создания новых устройств, где можно управлять экситонными состояниями с помощью как оптического, так и магнитного полей. В данной работе мы исследовали экситон-фотонную связь в структурах на основе магнетиков, сопряженных с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Исследовались две структуры: первая — монослой ДПМ на волноводе с резонансом, возникающим за счёт формирования неизлучающей моды под световым конусом; вторая — монослой ДПМ на структурированном волноводе, где резонансный отклик формируется за счёт создания фотонного кристалла. В качестве материала для волновода выступала магнитная пленка железо-висмутового граната.

Путем проведения измерений дисперсии отражения и фотолюминесценции как зависимости соответствующих спектров от угла в геометрии задней фокальной плоскости нами было экспериментально исследовано взаимодействие экситонов с фотонными модами в монослоях двумерных Ван-дер-Ваальсовых полупроводников, сопряженных с оптическими резонаторами на основе магнитных пленок. Исходя из измеренных при низкой и комнатной температурах кривых спектроскопии отражения и фотолюминесценции с угловым разрешением, были произведены оценки соответствующей силы связи свет–вещество. Также было проведено сравнение экспериментальных дисперсий с результатами моделирования методом FMM (Fourier modal method).

Работа поддержана Минобрнауки России, Соглашение 075-15-2024-680.

1.V Kravtsov et al. *2D Mater.*, **9**, 015019 (2023).

Е.М. Колобкова (м.н.с., НИЦ «Курчатовский институт»),
И.С. Езубченко (н.с., НИЦ «Курчатовский институт»),
М.Л. Занавескин (к.ф.-м.н., нач. отд., НИЦ «Курчатовский институт»)

ЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОТВОД ИЗ АЛМАЗА ДЛЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN

Интенсивные исследования полупроводников типа III-N и их твердых растворов в течение последних десятилетий привели к созданию новых приборов для силовой и сверхвысокочастотной электроники. Однако, потенциал устройств на GaN ограничен тепловыделением в активной области транзистора, что объясняется низкой теплопроводностью используемых материалов [1]. Неэффективный теплоотвод через подложку значительно снижает мощность и срок службы устройств. В настоящее время ведутся исследования по возможности интеграции нитридных гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) и алмаза, обладающего рекордной теплопроводностью среди материалов подложек для GaN [2].

Предложенные зарубежными промышленными и научно-исследовательскими лабораториями способы создания таких структур имеют ряд технологических недостатков, которые не позволяют запустить их в промышленное производство, до сих пор оставляя их на уровне единичных прототипов или расчётных математических моделей.

В настоящей работе описан новый подход к созданию теплоотвода для ГЭС GaN, состоящий из комбинации слоя монокристаллического кремния и поликристаллического алмаза. Была разработана методика молекулярно-лучевой эпитаксии GaN на Si (111) высокого кристаллического качества с последующим применением на комбинированных подложках кремния с алмазом. Был проведён подбор специфической архитектуры слоев со вставками AlN и градиентными слоями $Al_xGa_{1-x}N$ переменного состава, а также условий начальной стадии нитридации Si (111). Таким образом, была решена проблема изгибающих деформаций и разрушения ГЭС под действием механических напряжений из-за несоответствия коэффициентов температурного расширения материалов подложки и плёнки. Сформированные ГЭС GaN обладали высокими электрофизическими параметрами двумерного электронного газа (концентрация носителей $1.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, подвижность носителей $1600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, слоиое сопротивление 330 Ом/кв.).

Термометрические измерения при рассеиваемой мощности выше 7 Вт/мм и сравнение с технологией GaN на SiC показали, что использование нового типа подложек позволяет понизить температуру активной области более чем на 50°C и увеличить время наработки до отказа устройств в 100 раз [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

1. J. Kuzmík et al., *IEEE Trans. Electron Devices*, **61**, 3429 (2014).
2. A.V. Inyushkin et al., *Phys. Rev. B*, **97**, 144305 (2018).
3. M.Y. Chernykh et al., *Appl. Materials Today*, **26**, 101338 (2022).

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ЧАСТИЧНО ЭКРАНИРОВАННОЙ
ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время активно исследуются возможности создания эффективных компактных терагерцевых (ТГц) приборов. В частности, активно исследуются структуры на основе двумерных электронных систем (ДЭС), в том числе графена, для детектирования [1] и усиления [2]. Одной из проблем при создании ТГц приборов является обеспечение эффективного отклика ДЭС на внешнее излучение, которая может быть решена за счет использования одиночных и периодических металлических затворов над ДЭС, выступающих в роли концентраторов электрического поля [3–5]. Тем не менее точное решение задачи дифракции в частично экранированной ДЭС все еще не было получено.

В настоящей работе теоретически исследовано рассеяние плоской ТГц электромагнитной волны на металлическом электроде, частично экранирующем ДЭС. Свойства ДЭС определяются её динамической проводимостью. Получено аналитическое выражение для электрического поля в рассматриваемой структуре. Для этого было решено волновое уравнение методом Винера–Хопфа (выполнена факторизация уравнения с целью его разделения на функции, аналитические в верхней и нижней комплексной полуплоскости, затем получено аналитическое решение факторизованного уравнения) [6,7]. Исследован пространственный масштаб спада амплитуды электрического поля в подзатворной и открытой области ДЭС, а также коэффициент конверсии падающей волны в экранированные и неэкранированные плазмоны в ДЭС.

Вычисленные распределения полей могут быть напрямую использованы для вычисления фототоков в двумерных системах, например, возникающих по механизму светового давления или термоэлектрического эффекта [8].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 24-79-00094).

1. D. A. Bandurin et al., *Nat. Commun.* **9**, 5392 (2018).
2. S. Boubanga-Tombet et al., *Phys. Rev. X*, **10**, 031004 (2020).
3. O. Sydoruk, K. Choonee, and G. C. Dyer, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **5**, 486 (2015).
4. G. R. Aizin and G. C. Dyer, *Phys. Rev. B* **86**, 235316 (2012).
5. V. V. Popov et al. *Phys. Rev. B* **86**, 195437 (2012).
6. B. Noble “Methods Based on the Wiener-Hopf Technique for the Solution of Partial Differential Equations.”, *Pergamon Press, London & New York*, 246 pp (1959).
7. E. Nikulin et al. *Phys. Rev. B* **103**, 085306 (2021).
8. A. A. Gunyaga, M. V. Durnev, and S. A. Tarasenko *Phys. Rev. B* **108**, 115402 (2023).

А.С. Панфилов (асп., 2 год, ННГУ, каф. ФПЭН),
С.В. Хазанова (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, каф. ФПЭН)

РАЗРАБОТКА ДИЗАЙНОВ Ge/SiGe ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ МАХА–ЦЕНДЕРА

Развитие оптической связи требует создания всё более совершенных фотонных интегральных схем. В соединениях центров обработки данных широко используются модуляторы по схеме Маха–Цендера (ММЦ), при этом ММЦ предназначен для модуляции как синфазной, так и квадратурной компоненты сигнала. Принцип действия этого устройства основан на вариации коэффициента преломления под воздействием электрического поля на телекоммуникационной длине волны. Поскольку изменение коэффициента преломления напрямую связано с изменением коэффициента поглощения, для реализации данных эффектов могут использоваться массивы гетероструктур полупроводников группы IV, которые считаются отличной платформой для передачи данных следующего поколения благодаря хорошо отработанной комплементарной оксид металла–полупроводник (КМОП) технологии. Их оптические свойства обусловлены появлением прямозонных переходов, вследствие деформации и легирования, модифицирующих зонную диаграмму гетеросистемы. Слои германия, окруженные напряженными слоями SiGe, образуют квантовые ямы с гетеропереходами первого рода подобно материалам III–V, что приводит к поглощению при прямых межзонных переходах в Г-точке [1]. Вариация поглощения при воздействии внешнего напряжения обусловлена квантово-размерным эффектом Штарка.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование изменения показателя преломления в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1,55 мкм), подобно аналогичным исследованиям для прямозонных гетероструктур III–V [2]. Для этого с помощью численного метода конечных разностей было решено уравнение Шредингера. На основе рассчитанных энергий размерного квантования и огибающих волновых функций была получена мнимая часть диэлектрической проницаемости как результат сложения межзонного и экситонного вкладов. Для расчёта экситонного вклада были дополнительно получены энергии связи и боровские радиусы экситонов вариационным методом. С помощью соотношений Крамерса–Кронига получены спектры изменения показателя преломления под действием обратного смещения (10–60 мВ/нм) на требуемых длинах волн.

Результаты расчётов показывают заметное изменение показателя преломления в области длин волн вблизи 1,55 мкм, что позволяет использовать данные гетероструктуры в качестве электрооптически активной среды модулятора по схеме Маха–Цендера.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

1. K. Guilloy et al., *ACS Photonics*, **3**, 1907 (2016).
2. K. Nakamura et al., *IEEE journal of quantum electronics.*, **28**, 1670-1677 (1992).

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ С ДРЕЙФОМ

В работе мы показываем, что взаимодействие постоянного дрейфа носителей заряда в двумерных электронных системах (ДЭС) с магнитным полем ТЕ-волны (которое можно назвать высокочастотным эффектом Холла) оказывает заметное влияние на высокочастотную проводимость и электромагнитные свойства ДЭС. Мы выводим соответствующий тензор электродинамической проводимости:

$$\sigma^{ED} = \frac{\sigma_0}{\tilde{\omega} - \mathbf{k}\mathbf{u}_0} \begin{pmatrix} \frac{\omega^2 + (k_y u_0)^2}{\omega - \mathbf{k}\mathbf{u}_0} & k_y u_0 \\ k_y u_0 & \omega - \mathbf{k}\mathbf{u}_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

и предсказываем образование двумерных гальваномагнитных волн (2Д ГМВ) со спектром

$$\omega = \mathbf{k}\mathbf{u}_0 - \frac{i}{\tau} \frac{A^2}{1+A^2}, \quad (2)$$

аналогичным спектру ГМВ в объемных полупроводниках [1, 2]; в формулах (1), (2) $\sigma_0 = ie^2 n_{2d} / m\omega$, $e > 0$ – заряд электрона, m – эффективная масса, ω – круговая частота, $\tilde{\omega} = \omega + i/\tau$, τ – эффективное время рассеяния электронов, n_{2d} – поверхностная плотность носителей заряда в ДЭС, ДЭС лежит в плоскости ОХУ, дрейф u_0 направлен вдоль оси ОХ, волновой вектор k лежит в плоскости ДЭС (рис. 1).

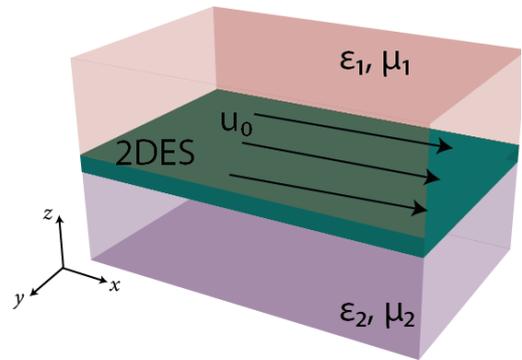


Рис. 1. ДЭС с дрейфом, помещенная между двух диэлектриков.

В результате мы находим, что 2Д ГМВ реализуется как провал в коэффициенте отражения эванесцентной ТЕ волны, падающей на ДЭС. Также мы исследуем отклик ДЭС на возбуждающее излучение и определяем отличия от предсказаний квазистатического подхода. В частности, мы находим, что высокочастотный эффект Холла ответственен за двойное лучепреломление эванесцентной ТЕ-волны, падающей на ДЭС, и, наиболее вероятно, за черенковское усиление падающей волны в пределе низких частот.

В то же время, квазистатический подход может использоваться при описании поперечно-магнитных плазменных волн (при $v_p \ll c$, где v_p – фазовая скорость такой волны), а также в электродинамических задачах со специфической геометрией (например, однородных по оси, перпендикулярной дрейфу). Результаты работы опубликованы в [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-72-01013.

1. A. Morozov and P. Shubin, Sov. Phys. JETP **19**, 484 (1964).
2. V. Kopylov, JETP Letters **29**, 23 (1979).
3. Petrov A. S., Svintsov D., JETP Letters **119**, 800 (2024).

А.В. Савин (асп., м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Е.М. Рогинский (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
М.Б. Смирнов (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ),
Д.В. Панькин (специалист по рамановской спектроскопии научного парка СПбГУ)

ПОИСК РАВНОВЕСНЫХ СТРУКТУР И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЙ-ОКСИДНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК

Ключевым элементом МОП-транзисторов, наиболее широко используемых элементов современной электроники, является интерфейс оксид–полупроводник. В кремниевой электронике в качестве оксида преимущественно используют SiO_2 . Требование миниатюризации ставит перед технологами задачу получения ультратонких оксидных слоев, что делает актуальной проблему понимания законов, управляющих формированием интерфейсов на атомном уровне. Известно, что изучение структурных параметров с помощью динамических свойств успешно выполняется спектроскопическими методами. Рамановская спектроскопия доказала свою эффективность как весьма информативный и чувствительный метод неразрушающего анализа структуры полупроводниковых СР [1]. Однако, детального, основанного на строгих квантовомеханических расчетах, теоретического анализа полученных спектров до сих пор никто не проводил. Понимание связи структура–свойства невозможно без проведения теоретических исследований, основанных на высокоточных расчётах электронной структуры.

В работе были рассмотрены различные модификации сверхрешёток (СР) Si/SiO_2 . При выборе пространственной модели СР чаще всего используют интерфейсы, образованные поверхностями (001) кристаллов кремния и β -кристобалита. Такой подход хорошо себя зарекомендовал, подтверждением чему является целый ряд публикаций. Нами было выполнено моделирование гетероструктур на основе кубического кремния "сращённого" с альфа-фазой кристобалита оксида кремния. Методом компьютерного моделирования с применением неэмпирических квантово-механических расчётов выполнена оптимизация структурных параметров, за которой произведён расчёт динамических свойств. В фононном спектре выявлены мнимые моды, указывающие на нестабильность начальной структуры. Однако, небольшие искажения структуры вдоль мнимых мод позволили найти устойчивую фазу. Аналогичные исследования были выполнены для структур, повернутых на 45 градусов вдоль оси 4-го порядка кристобалита, и структур с кислородной вакансией.

Основной результат настоящей работы состоит в том, что впервые с применением неэмпирических расчетных методов компьютерного моделирования найдены устойчивые структуры СР Si/SiO_2 с резким интерфейсом. Изучены фононные состояния, ИК и КР-спектры, в которых обнаружены характеристические линии, по которым можно установить наличие в исследуемых образцах интерфейсов данного типа.

1. M. Benyoucef, M. Kuball, J.M. Sun, G.Z. Zhong, X. W. Fan. J. Appl. Phys. (2001). V. 89, P. 7903-7909.

В.А. Смирнова (асп., 2 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩИЕ ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ПОПРАВКИ И ЭФФЕКТЫ НЕПОРАБОЛИЧНОСТИ ЗОН В ТЕОРИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В настоящее время основным методом расчёта энергетического спектра и волновых функций носителей заряда в полупроводниковых квантово-размерных структурах является метод эффективной массы или метод огибающих волновых функций. Как правило, в рамках данного подхода не учитываются короткодействующие интерфейсные поправки, имеющие место в структурах с резкими гетерограницами [1]. Кроме того, в большинстве работ авторы ограничиваются квадратичным по волновому вектору \mathbf{k} приближением в эффективном кр-гамильтониане гетероструктуры. Однако влияние быстроизменяющегося потенциала на гетерогранице и учёт эффектов непараболичности зонной структуры исходных объёмных материалов может приводить к значительному изменению энергетического спектра и волновых функций носителей заряда. Влияние этих эффектов наиболее сильно проявляется в структурах с узкими квантовыми ямами, ширина которых составляет единицы монослоёв. В частности, наличие короткодействующей части интерфейсного потенциала приводит к смешиванию состояний дырок (зона Γ_8) в гетероструктурах на основе кубических полупроводников A^3B^5 .

В настоящей работе, в рамках точно решаемой одномерной модели сверхрешётки проводится детальный анализ влияния рассматриваемых эффектов на энергетический спектр и волновые функции электронов. В основе расчетов лежит численное решение уравнения Шредингера с использованием метода псевдопотенциала. Проводится сравнение полученных точных результатов, следующих из рассматриваемой микроскопической теории, с результатами приближённых расчётов методом эффективной массы [2]. Подробно исследуется вклад рассматриваемых эффектов в зависимости от ширины и глубины квантовых ям в сверхрешётке. Показано, что наибольшее влияние эти эффекты оказывают на возбуждённые электронные состояния.

1. Г.Ф. Глинский, М.С. Миронова, ФТП, **48**(10), 1359 (2014).
2. Г.Ф. Глинский, Письма в ЖТФ, **44** (6), 17 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45763.17113.

А.В. Снегирев (асп., 1 год, НГУ, каф. ФПП, лаборант ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
С.А. Тарасенко (д.ф.-м.н., зав. сект., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

МАГНИТОИНДУЦИРОВАННЫЙ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МОНОСЛОЯХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В последнее время значительный интерес вызывают двумерные полупроводниковые кристаллы, такие как монослои дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Уникальные оптические и транспортные свойства таких систем связаны в первую очередь с необычной зонной структурой, содержащей пары электронных и дырочных долин, расщепленных по спину сильным кристаллическим спин-орбитальным взаимодействием. Из-за большого расстояния в импульсном пространстве и, как следствие, относительной слабости междолинного рассеяния индекс долины является хорошо сохраняющейся величиной. Доступ к долинной степени свободы обеспечивается правилами отбора для межзонных оптических переходов, которые чувствительны к циркулярной поляризации света.

Данная работа посвящена теоретическому исследованию фотогальванического эффекта в монослоях ДПМ в присутствии постоянного магнитного поля, лежащего в плоскости образца. Рассмотрены структуры со спин-орбитальным расщеплением Рашбы, обусловленным взаимодействием монослоя ДПМ с подложкой. Показано, что межзонное возбуждение ДПМ структуры приводит к возникновению фототока поляризованных по спину и долинному индексу носителей заряда. Направление фототока определяется ориентацией внешнего магнитного поля, а спиновая и долинная поляризация носителей – знаком циркулярной поляризации света.

Разработана кинетическая теория такого магнитоиндуцированного фотогальванического эффекта. Рассчитан спектр возбуждения фототока, возникающего в монослое ДПМ в условиях стационарной оптической накачки. Также рассмотрен фотоотклик структуры на короткий оптический импульс. В этом случае оптический импульс создает когерентную суперпозицию спиновых состояний в долине, а последующие квантовые биения приводят к колебаниям фототока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00211.

А.А. Харченко, (м.н.с., СПБАУ им. Ж.И. Алферова),
М.В. Максимов (СПБАУ им. Ж.И. Алферова),
А.М. Надточий (НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург),
Н.Ю. Гордеев, Ю.М. Шерняков, А.А. Бекман,
Г.О. Корнышов, А.С. Паюсов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ОПТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ В ВОЛНОВОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ «КВАНТОВЫЕ ЯМА-ТОЧКИ»

Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ), работающие в диапазоне длин волн 900–1100 нм находят применение, например, в изготовлении перестраиваемых лазеров с внешним резонатором, которые используются в спектроскопии или в оптической когерентной томографии [1]. Типичные ПОУ на основе квантовых ям InGaAs имеют максимальные значения коэффициента усиления 15–30 дБ в полосе 30–40 нм при значениях токов накачки 150–200 мА [1, 2]. Спектральную полосу ПОУ можно расширить, формируя структуры с активной областью, состоящей из нескольких слоёв, спектрально сдвинутых относительно друг друга. Однако, рост более трех КЯ InGaAs требует применения сложной технологии компенсации упругих напряжений [3].

Данная проблема может быть решена использованием в качестве активной области ПОУ $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ квантовых яма-точек (КЯТ) [4], которые можно последовательно осаждать (более 15 слоёв) без образования дислокаций, что позволило создать суперлюминесцентные диоды с широким (80–120 нм) спектром излучения [5] и является предпосылкой к созданию ПОУ, работающих в широком спектральном диапазоне.

В данной работе впервые исследовано оптическое усиление излучения от внешнего источника в волноводных p-i-n структурах, содержащих 7 слоев КЯТ различной толщины. Получены зависимости интенсивности усиленного излучения и длины волны, соответствующей просветлению структуры, от тока накачки в спектральном диапазоне 990–1075 нм. Представлена методика расчета коэффициента оптического усиления, основанная на учете интенсивности усиленного излучения образца при токе прозрачности. Полученный таким образом коэффициент оптического усиления в исследованных структурах достигает 22 дБ при токе накачки 57 мА на длине волны 1040 нм, при этом в диапазоне 1010–1075 нм оптическое усиление превышает уровень 10 дБ. Результаты демонстрируют высокий потенциал квантовых яма-точек для использования в качестве активной области полупроводниковых оптических усилителей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00038.

1. А.А. Лобинцов, и др. Квант. электрон., **38**, 661 (2008).
2. M. Tang, et al., Optics Lett., **34**, 2204 (2009).
3. N. V. Baidus et al., Semiconductors, **52**(12), 1547–1550 (2018).
4. M.V. Maximov. et al., Appl. Sci., **10** (3), 1038 (2020).
5. М. В. Максимов, и др. ФТП, **57** (4), 301 (2023).

С.А. Хахулин (асп., 4 год, каф. МНЭ, СПбГЭТУ),
О.С. Комков (д.ф.-м.н., зав. каф. МНЭ, СПбГЭТУ),
А.Д. Буравлёв (д.ф.-м.н., зав. лаб. ЛМНЭ, СПбГЭТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА МНОГОПЕРИОДНЫХ СВЕРХРЕШЁТОК МЕТОДОМ ФОТООТРАЖЕНИЯ

Прогресс в технологиях роста полупроводниковых сверхрешёток (СР) привёл к реализации сверхмногопериодных (СМП) структур с числом слоёв от нескольких сотен до нескольких тысяч. Одним из перспективных применений таких структур является создание на их основе компактных источников излучения ТГц диапазона с перестраиваемой длиной волны. Разработка таких устройств на основе СМП-СР требует комплексного изучения их энергетического спектра. Существующие подходы к моделированию этого спектра не всегда корректно описывают его в реальных образцах. Это может быть связано как с разбросом технологических параметров роста, так и с отсутствием детального экспериментального анализа, на основе которого можно сделать выводы о зонной структуре сверхрешёток.

В настоящей работе приведён сравнительный анализ спектров фотоотражения (ФО) сверхрешёток GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x = 0.3, 0.35$) различного уровня легирования с шириной квантовых ям от 4 до 12 нм, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Ширина барьерных слоёв в структурах 2 нм, количество периодов 100. Спектры ФО структур с уровнем сплошного легирования $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ содержат узкие дифференциально-подобные линии, соответствующие межзонным оптическим переходам. Амплитуды спектральных особенностей оптических переходов, связанных с полностью локализованными состояниями электронов, для всех структур сопоставимы. Спектральные линии основного межзонного перехода имеют уширение порядка единиц мэВ. В случае электронных состояний, частично локализованных в пределах квантовых ям, интенсивность соответствующего пика зависит от степени локализации носителей зарядов.

Увеличение уровня легирования структур до 10^{17} см^{-3} приводит к заметному уширению спектральных линий с уменьшением их амплитуды для низкоэнергетических переходов. Это может быть связано с увеличением приповерхностного электрического поля, под влиянием которого уменьшается интеграл перекрытия электронных состояний между соседними ямами. Энергия основного межзонного перехода при этом не изменяется по сравнению со структурой с $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ интенсивность сигнала ФО уменьшается на порядок с существенным уширением спектральных линий.

Экспериментальные и рассчитанные значения энергий межзонных оптических переходов в структурах с $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ совпадают в пределах нескольких процентов, что продемонстрировано на примере структур с различной шириной квантовых ям.

1. Dashkov A.S., Khakhulin S.A. et al. *J. Semicond.*, **45**(2), 022701.

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

УДК 535.3

А.Г. Аветисян (студ., 4 курс бак., РАУ),

М.Я. Винниченко (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, ВИФШ),

Э.С. Акобян (к.ф.-м.н., н.с., РАУ, ИХФ НАС РА)

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Оптоэлектронные свойства квантовых точек (КТ) обладают уникальными характеристиками, что делает их одним из ключевых элементов технологических прорывов в области полупроводниковых технологий [1]. Поэтому крайне важно рассматривать вычислительные методы, позволяющие эффективно моделировать эти наноструктуры, избегая при этом чрезмерных вычислительных затрат, связанных с разнообразием геометрий КТ, доступных для получения современными методами роста.

В данном исследовании метод конечных элементов (МКЭ) продемонстрирован как мощный вычислительный инструмент для моделирования полупроводниковых КТ, обладающий высокой эффективностью при анализе сложных и нетривиальных геометрических форм. С помощью точных аппроксимаций эффективной массы и огибающей волновой функции мы получили одночастичные волновые функции и энергетические уровни в структурах квантовых точек CdSe [2].

Геометрические формы, варьирувавшиеся от прямоугольных и сферических до цилиндрических и конических конфигураций, а также более экзотических форм, таких как наноголоволастики и нанозвезды, были исследованы с помощью МКЭ. Нами были получены правила отбора для переходов между различными состояниями, которые представлены в работе для переходов между основным состоянием и первыми тремя экситонными уровнями, что позволяет получить полное представление об их поведении в различных геометрических конфигурациях.

Рассчитаны спектры поглощения и фотолюминесценции. Важным результатом является значительное отличие в эффектах размерного квантования для различных структур: это не только влияет на форму волновых функций и энергетические уровни, но также по-разному воздействует на электроны и дырки из-за разницы в эффективной массе. Таким образом, исследование демонстрирует, что МКЭ является эффективным инструментом для моделирования полупроводниковых КТ с различными геометрическими формами. Вычисленные спектры поглощения и фотолюминесценции сильно зависят от геометрии КТ, что подчеркивает значимость инженерии формы в управлении межзонными оптическими свойствами. Наши результаты показывают, что форма КТ является ключевым параметром, влияющим на оптические характеристики, что открывает новые возможности для улучшения фотонных устройств через оптимизацию геометрии.

1. M.A. Cotta, *ACS Appl. Nano Mater.*, **3**, 4920 (2020).

2. G.A. Mantashian et al., *Computation*, **11**, 5 (2023).

А.Ю. Адлер (студ., 4 курс, СПбПУ, ВИФШ, ИЭиТ),
Е.В. Волынский, Р.В. Устименко, Д.А. Караулов, М.Я. Винниченко (СПбПУ, ВИФШ, ИЭиТ),
Д.Б. Айрапетян (РАУ, Армения)

СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ InAsP

Полупроводниковые гетероструктуры A^3B^5 могут стать основой для детекторов, работающих в коротковолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра 0,9–3 мкм. Подобные приборы имеют применение для химического и геологического зондирования или биомедицинской визуализации, в системах передачи оптических данных. Среди полупроводниковых соединений A^3B^5 InAsP выступает в качестве перспективного кандидата для устройств на основе нитевидных нанокристаллов (ННК), работающих в коротковолновом ИК диапазоне спектра. Данный твёрдый раствор имеет прямую запрещенную зону во всем диапазоне составов, что позволяет регулировать ширину запрещенной зоны от 1,34 до 0,35 эВ.

Образцы массивов самоиндуцированных бескатализаторных ННК InAsP были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках SiO/Si(111) с различными отношениями потоков A^3 и B^5 групп, а также P_2 к As_4 . Было изготовлено несколько образцов ННК InAsP с различным содержанием фосфора, а также реперный образец исходных ННК InAs.

Из изображений сканирующей электронной микроскопии видно, что увеличение отношения потоков P_2 к As_4 приводит к монотонному уменьшению отношения длины к диаметру наноструктур InAsP. Во всех образцах рост ННК сопровождается формированием паразитных объёмных островков, который становится более заметным при более высоких потоках P_2 . Анализ изображений просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения отдельных ННК показал, что ННК InAsP демонстрируют особенности кристаллической структуры, аналогичные самоиндуцированным InAs ННК.

При помощи вакуумного фурье-спектрометра, работающего в пошаговом режиме, были получены спектры фотолюминесценции (ФЛ) в коротковолновом ИК диапазоне спектра при различных уровнях лазерной оптической накачки при различных температурах. Спектры ФЛ демонстрируют постоянный сдвиг в сторону больших энергий с повышением содержания фосфора в массивах ННК InAsP по сравнению с исходными ННК InAs. На спектрах ФЛ был обнаружен высокоэнергетический пик, соответствующий гексагональной фазе WZ, высокоинтенсивный пик, связанный с политипной фазой ННК, и низкоэнергетичный хвост кубической фазы ZB, связанный с паразитными объёмными островками. При повышении температуры все пики испытывают красное смещение по закону Варшни. Сдвиг пиков в сторону больших энергий с увеличением оптической накачки может быть связан с эффектом заполнения зоны.

Положения высокоинтенсивного пика ФЛ ННК InAsP с различным содержанием фосфора лежит между теоретическими значениями зависимостей ширины запрещенной зоны для ZB и WZ от концентрации фосфора, что связано с образованием политипа фаз.

О.В. Бурдуленко (студ., 3 курс, Университет ИТМО, ФТ МФ, НОЦ ФиОИ),
Д.С. Гец (к.ф.-м.н., Университет ИТМО, ФТ МФ, Физ. фак.),
Л.Е. Зеленков (к.х.н., Центр Инноваций и Развития Циндао)

ДИНАМИКА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ И НАНОКРИСТАЛЛАХ ПЕРОВСКИТА CsPbBr_3 , ЛЕГИРОВАННОГО Cd

Галогенидные перовскиты свинца — класс полупроводниковых материалов со структурой перовскита, имеющих большое значение в различных областях энергетики и оптоэлектронных технологий. В последние годы эти структуры стали привлекать внимание как перспективные оптические материалы для активной лазерной среды. И это не случайно: перовскитные полупроводники обладают всеми необходимыми характеристиками для хорошей лазерной усиливающей среды, включая высокий коэффициент инжекции носителей, прямую запрещенную зону и высокую квантовую эффективность. Тем не менее, существуют и ограничения для их использования в лазерных устройствах, в основном из-за высокого уровня возникновения оже-рекомбинации, что влияет на повышение порогов усиленного спонтанного излучения.

В данной работе мы изучаем эффекты включений катионов кадмия в покрытые лецитином квантовые точки и нанокристаллы CsPbBr_3 , поскольку введение этих ионов в стандартный состав существенно меняет характеристики материала. Легирование позволяет изменять электронные свойства структур, что, в свою очередь, может влиять на скорость рекомбинации носителей заряда и их подвижность, а также увеличивает ширину запрещенной зоны, смещая спектр люминесценции в синюю область.

Для анализа динамики носителей заряда были проведены эксперименты по изучению оптических свойств. В качестве методов использовали время-разрешенную спектроскопию фотолюминесценции, степенные зависимости квантового выхода фотолюминесценции, измерение порогов усиленной спонтанной люминесценции. Эти исследования помогли оценить влияние кадмия на перовскит и продемонстрировали значительный потенциал его применения в будущих технологиях.

А.И. Веретенников (студ., 2 курс маг., НИУ ИТМО, ФФ),
М.В. Рахлин (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лаб. Квантовой фотоники)

НАБЛЮДЕНИЕ ОДНОФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В С-ДИАПАЗОНЕ В МЕТАМОРФНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs/InGaAs И МНОГОСЛОЙНЫМ БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Эпитаксиальные полупроводниковые квантовые точки (КТ) хорошо зарекомендовали себя в качестве источников света с неклассической фотонной статистикой, необходимых для реализации перспективных схем квантовой обработки информации [1]. Такие источники, излучающие в телекоммуникационных диапазонах необходимы, в частности, для применений в защищенных оптоволоконных линиях связи, использующих методы квантовой криптографии. Перспективным подходом к их реализации является рост на подложках GaAs гетероструктур с метаморфным буферным слоем (ММБС) и КТ InAs [2]. Данный метод позволяет использовать в конструкции гетероструктур распределенные брэгговские отражатели (РБО), включающие пары четвертьволновых слоев, выполненные в системе (Al,Ga)As, и изготавливать на их основе оптические микрорезонаторы [1].

В данной работе представлено экспериментальное наблюдение однофотонного излучения в гетероструктуре с РБО и КТ InAs/InGaAs, выращенной на ММБС методом молекулярно-пучковой эпитаксии (Рис. 1а). Спектры фотолюминесценции (ФЛ), измеренные с микронным пространственным разрешением при гелиевых температурах, показали наличие узких интенсивных линий, отвечающих излучению одиночных КТ в С-диапазоне (Рис. 1б). При исследовании однофотонных корреляций излучения КТ было получено значение автокорреляционной функции $g^{(2)}(0) = 0.17$, подтверждающее однофотонную природу излучения (Рис. 1в). В докладе также будут приведены результаты структурной и оптической характеристики изготовленных метаморфных структур с РБО и КТ InAs/InGaAs.

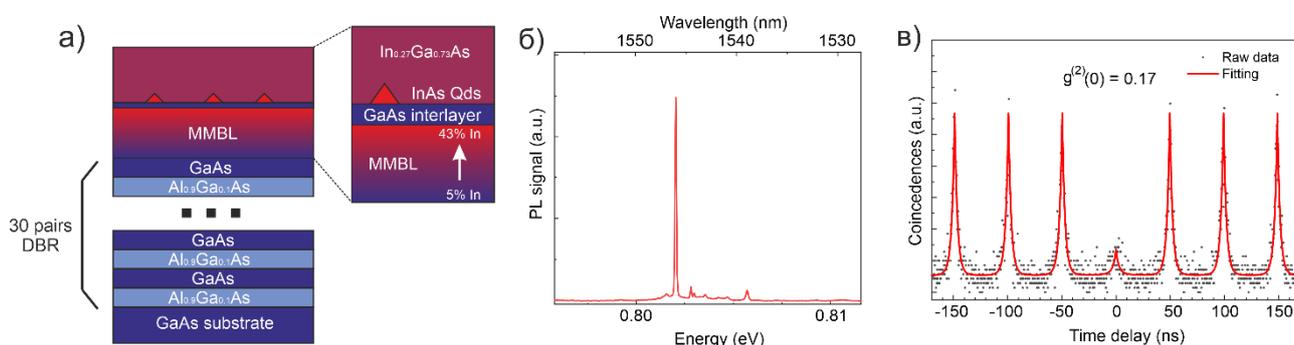


Рис.1. (а) – схема исследуемой структуры, (б) – спектр ФЛ одиночной КТ, (в) – измеренная статистика однофотонного излучения (точки) с аппроксимацией (красная кривая)

1. T. Heindel et al. *Advances in Optics and Photonics* **15**(3), 613-738 (2023).
2. С.В. Сорокин и др., *Письма в ЖЭТФ* (2024) [*В печати*].

Д.Н. Горкин (студ., 5 курс специалитет, МГУ им. М.В. Ломоносова),
А.М. Смирнов (д.ф.-м.н., доц., МГУ им. М.В. Ломоносова, ИРЭ РАН)

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ЛЕГИРОВАНИЯ МЕДЬЮ

В последние десятилетия легированные квантовые точки стали объектом интенсивных исследований благодаря своим уникальным оптическим и электронным свойствам, которые делают их перспективными для применения в различных областях науки и техники. Эти наноразмерные полупроводниковые структуры, обладающие размерной зависимостью свойств, открывают новые горизонты в таких направлениях, как солнечные элементы, биомедицинская диагностика. Фотолюминесценция изученных нанокристаллов характеризуется длинами волн излучения, приходящимися на ближний ИК-диапазон 700–900 нм – диапазон наибольшей прозрачности живых тканей. Это позволяет использовать нанокристаллы для создания биометок с улучшенными характеристиками, в частности, с улучшенной контрастностью наблюдения при время-разрешенной регистрации сигнала. Актуальность изучения легированных квантовых точек обусловлена не только их потенциалом в создании новых технологий, но и необходимостью глубокого понимания механизмов легирования, которое значительно влияет на их характеристики.

В настоящей работе были получены спектры фотолюминесценции (ФЛ) квантовых точек с разной степенью легирования медью. Характерной особенностью является то, что помимо экситонной полосы ФЛ, обнаружено появление примесной полосы фотолюминесценции в ближнем инфракрасном диапазоне. Это объясняется тем, что легированная в нанокристалл медь эффективно участвует в процессах захвата и при наличии хотя бы одного атома примеси участвует в процессах рекомбинации носителей, приводя к тушению экситонной люминесценции и появлению примесной. С помощью методики, реализованной в данной работе, становится возможным изучение спектров возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) конкретных подансамблей квантовых точек. Путем анализа спектров ВФЛ были определены энергии основных экситонных переходов. Также наблюдается изменение интенсивности пиков ФЛ в зависимости от уровня легирования. Сравнивая спектры ВФЛ легированных и нелегированных образцов, удаётся определить положения уровней меди, легированной в нанокристалл.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10008, <https://rscf.ru/project/23-72-10008/>

И.А. Козко (студ., 1 курс маг., МФТИ, Физтех, каф. ФТН),
Е.П. Карасёва (студ., 4 курс бак., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, каф. ФМиН),
В.М. Кондратьев (м.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, лаб. ОГСиОМ),
А.Д. Большаков (д.ф.-м.н., дир., МФТИ, Физтех, Центр фотоники и двумерных материалов)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК, А ТАКЖЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaP, GaN И Si

Использование углеродных наноточек (УТ) в роли эффективных флуоресцентных агентов с контролируемым оптическим спектром излучения имеет ряд преимуществ, таких как низкая токсичность, доступность прекурсоров, а также биосовместимость [1, 2]. Для нивелирования эффектов агломерации реализуется осаждение УТ на кристаллические структуры с высоким отношением площади поверхности к объему, в результате чего становится возможным формирование флуоресцентных слоёв толщиной порядка монослоя УТ [3]. Такими структурами, в частности, являются нитевидные нанокристаллы (ННК).

В данной работе были получены гибридные структуры на базе УТ и ННК GaP, GaN и Si методом капельного осаждения водного раствора УТ на вертикальные массивы ННК с последующей инкубацией образцов в течение 5 часов. ННК GaP были получены по самокаталитическому механизму молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), ННК GaN – по самоиндуцированному механизму МПЭ. Для синтеза ННК Si использовался метод плазмохимического травления кремниевой подложки с ориентацией (111). УТ в свою очередь были синтезированы гидротермальным методом из двух органических прекурсоров: лимонной кислоты и этилендиамина. УТ, синтезированные по данному методу, обладают выраженным поглощением и ФЛ в видимом спектре длин волн [3].

Разработан подход к оценке удельной излучающей способности УТ на поверхности ННК в рамках метода конфокальной флуоресцентной микроскопии. Показано, что при унифицированных условиях нанесения УТ наибольшей интенсивностью ФЛ обладают гибридные наноструктуры на базе ННК GaP. Разработана модель взаимодействия УТ с поверхностью ННК GaP, GaN и Si в терминах величин межатомной энергии связи и удельной плотности адсорбционных центров кристаллической структуры поверхности ННК.

Полученные результаты интересны в первую очередь с точки зрения возможности создания гибридных светоизлучающих структур, свойствами которых можно управлять за счёт варьирования материала, структуры и геометрии ННК, а также параметров синтеза и нанесения УТ. Такие структуры могут быть эффективно использованы для решения задач биологии, сенсорики, а также для создания элементов нанофотоники.

1. G.V. Nenashev et. al., *J Mater Sci: Mater Electron*, **34**, 1–10 (2023).
2. S. Rag et. al., *ACS Omega*, **9**, 38916–38924 (2024).
3. V.V. Zakharov et. al., *Advanced Optical Materials*, **12**, 2303198 (2024).

Д.А. Луцевич (студ., 2 курс маг., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),
А.А. Головатенко (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ТРИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В СЛУЧАЕ КОЛЛОИДНЫХ НАНОПЛАТЕЛЕТОВ CdSe

Начало исследованию спиновых свойств носителей заряда в коллоидных сферических нанокристаллах CdSe при помощи метода накачки–зондирования было положено двадцать лет назад [1, 2]. Недавно аналогичные измерения были проведены для квазидвумерных наноплателетов на основе CdSe [3, 4]. В отличие от эпитаксиальных квантовых точек, ось анизотропии одиночного наноплателета, либо нанокристалла, CdSe может иметь произвольную ориентацию в пространстве. Ранее при исследовании спиновой динамики электронов в ансамблях нанокристаллов CdSe наблюдались осцилляции сигнала фарадеевского вращения в продольном магнитном поле [1, 2], что нетипично для эпитаксиальных квантовых точек.

Для понимания данного явления необходим теоретический анализ прецессии спина резидентных электронов в ансамбле произвольно ориентированных наноплателетов, либо нанокристаллов, обладающих одноосной анизотропией. Для описания спиновой прецессии в такой системе мы производим обобщение трионного механизма, предложенного ранее для эпитаксиальных квантовых точек [5], но не учитывающего возможности разной ориентации квантовых точек в ансамбле. Помимо наличия различных ориентаций оси анизотропии в ансамбле, мы также учитываем анизотропию g-фактора электрона.

Изучена зависимость начальной спиновой поляризации от площади импульса накачки и установлено, что при случайной ориентации оси анизотропии в ансамбле поляризация периодически меняет знак. Установлено, что даже при отсутствии анизотропии g-фактора осцилляции спиновой поляризации существуют и определяются наличием наноплателетов с осью анизотропии неколлинеарной направлению магнитного поля. Изучено влияние дисперсии частот ларморовой прецессии, вызванной анизотропией g-фактора, на затухание осциллирующей компоненты спиновой поляризации. Установлено, что в случае случайно ориентированного ансамбля при площади импульса накачки 2.5π неосциллирующая компонента почти отсутствует и наблюдаются спиновые биения, характерные для поперечного магнитного поля. Фурье анализ осцилляций сигнала фарадеевского вращения показывает, что в случайно ориентированном ансамбле биения происходят на частоте, характерной для поперечного g-фактора электрона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00300.

1. J.A. Gupta et al., *Phys. Rev. B*, **59**, R10421 (1999).
2. J.A. Gupta et al., *Phys. Rev. B*, **66**, 125307 (2002).
3. D. Feng et al., *ACS Nano*, **14**, 7237-7244 (2020).
4. S.R. Meliakov et al., *Nanomaterials*, **13**, 3077 (2023).
5. I.A. Yugova, et al., *Phys. Rev. B*, **80**, 104436 (2009).

Д.В. Сличенко (студ., 3 курс, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, каф. КФМиН),
М.Р. Позднякова (11 класс, Лицей ФТШ),
А.Е. Карпович (11 класс, Лицей ФТШ),
К.П. Котляр (к.ф.-м.н., лаб. ЭН, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ ФОТОНИКИ С ННК В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ Ag НАНОНИТЕЙ

В современном мире широко применяются различные устройства фотоники. Для создания оптоэлектроники нового поколения стоит задача миниатюризации таких приборов путем использования наноструктур. Размеры частей таких устройств находятся в нанодиапазоне, из-за чего их подключение к источникам питания и измерительным приборам сильно затруднено. На текущий момент основная методика подключения наноструктур, например, нитевидных нанокристаллов (ННК) [1], заключается в их нанесении на подложки с контактами, так чтобы концы ННК располагались на противоположных контактах. Основной проблемой этой методики является получение самих контактов – фотолитография имеет малое разрешение получаемого рисунка, а электронная литография является медленной технологией.

В настоящей работе мы предлагаем свою методику получения контактных площадок, позволяющих подключать как единичные ННК, так и сеть из ННК для ее исследования, характеристики и создания полупроводниковых приборов. Решение опирается на хаотическое распределение Ag-нанонитей (AgНН) при их осаждении из спиртового раствора на подложки (стекло, кремний). Вследствие того, что AgНН могут достигать до 25–40 мкм в длину, и при этом имеют толщину 100 нм, при определенной концентрации данного раствора они образуют хаотический рисунок, который позволяет формировать при последующих операциях массив контактных площадок. Для этого на поверхность подложки с AgНН проводится осаждение пленки золота толщиной, не превышающей половины радиуса AgНН, методом термического вакуумного напыления. Так как AgНН не закрыты золотом со всех сторон, они могут быть подвергнуты химическому жидкостному травлению. Как результат, после травления образца в концентрированной азотной кислоте формируется хаотический рисунок больших золотых контактных площадок (от 2×2 мкм до 15×15 мкм) с зазором в нанометровом диапазоне. Отметим, что для увеличения зазора между контактными площадками можно использовать НН большего диаметра. Далее на такую подложку наносятся различного рода наноструктуры (в нашем случае ННК р-GaN/InGaN/n-GaN со вставкой InGaN, излучающей в зеленом спектральном диапазоне (490–515 нм)). Общая длина кристаллов составляет 700–1200 нм, поэтому с большой вероятностью они располагаются своими концами на разных контактных площадках, после возможно подключение к ним различных измерительных приборов и источников питания. Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ 23-22-00-349.

1. Park H. K. et al., *Scientific reports.*, **6**(6), 28312 (2011).

ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ В НАНОКРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ InP

Оптические свойства квантовых точек или коллоидных нанокристаллов (НК) активно исследуются [1, 2]. Интерес представляют НК на основе InP в окружении различных оболочек. Например, оболочка ZnSe может создавать потенциальные барьеры различной высоты [2], что существенно влияет на энергетический спектр и волновые функции (в.ф.) электрона.

В работе исследованы энергетический спектр и в.ф. электрона в НК типа ядро/оболочка в рамках восьмизонной модели Кейна, приводящей к зависящей от энергии эффективной массе электрона $m_e(E)$. Оболочка НК может состоять как из полупроводниковых материалов, так и из органических молекул (лигандов). В первом случае используются стандартные граничные условия [3], сохраняющие значение в.ф. и её скорости на внутренней границе ядро/оболочка. Для лигандов применяются обобщённые граничные условия [3], характеризуемые одним параметром A , зависящим только от внешних характеристик барьера.

Рассчитаны энергии $1S_e$ (орбитальный момент $l = 0$) и $1P_e$ ($l = 1$) состояний. В случае органической оболочки электроны локализованы в ядре, в гетероструктурах InP/ZnSe возможна их делокализация в оболочку. Наличие сферической границы приводит к спин-орбитальному расщеплению $1P_e$ уровня по полному моменту $j = s + l$, где $s = 1/2$ – спин электрона, на состояния $j = 1/2$ и $j = 3/2$. В зависимости от типа оболочки НК знак и величина расщепления δ_{SO} могут меняться. При дополнительном учёте анизотропного расщепления δ_{an} , вызванного малой несферичностью, полный момент j перестаёт быть хорошим квантовым числом и состояния характеризуются его проекцией m на ось анизотропии. Это приводит к частичному перемешиванию уровней с моментами $j = 3/2$ и $j = 1/2$ и одинаковыми значениями m и дополнительному расщеплению уровней тонкой структуры. Показано, что зависимость отношения расщеплений δ_{an}/δ_{SO} от высоты потенциального барьера в гетероструктурах становится немонотонной при уменьшении толщины полупроводниковой оболочки НК.

Получены правила отбора для линейной и циркулярной поляризации однофотонного внутризонного перехода с учётом малой анизотропии и спин-орбитального взаимодействия. Рассчитаны вероятности переходов. Результаты могут применяться для анализа экспериментов типа накачка-зондирования [1,4].

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ №23-12-00300.

1. F. Sousa Velosa et. al. *Adv. Opt. Mater.* **10**, 2200328 (2022).
2. P. Cavanaugh et. al *J. Chem. Phys.* **159**, 134704 (2023).
3. К.И. Русских, А.В. Родина. ФТТ **66**, 1, 110-121 (2024).
4. P. Guyot-Sionnest, M.Shim, C.Matranga, M.Hines. *Phys. Rev. B*, **60**, R2181 (1999).

И.А. Смирнов (студ., 4 курс бак., СПбГУ, физ. фак., каф. фотоники),
И.И. Рыжов (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, физ. фак., каф. фотоники)

СПЕКТРОСКОПИЯ СПИНОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НАНОКРИСТАЛЛАХ CsPbI₃

В последние годы в научном сообществе всё больше повышается интерес к классу полупроводниковых материалов — галогенидных перовскитов. Они крайне интересны в связи с их применимостью в микроэлектронике и солнечной энергетике [1]. Одним из таких веществ является CsPbI₃, обладающим, однако, недостатком, существенно ограничивающим его практическое использование – деградацией на открытом воздухе. Этой проблеме не подвержены нанокристаллы CsPbI₃ в стеклянной матрице [2]. В данной работе исследована динамика электронов и дырок в нанокристаллах методом спектроскопии спиновых флуктуаций (ССФ) при температурах жидкого гелия, а также обнаружено явление устойчивой перезарядки нанокристаллов.

ССФ относится к магнитооптическим методам регистрации ЭПР. Его главным достоинством является невозмущающая природа: в основе метода лежит детектирование изменения поляризации света, проходящего сквозь образец под действием эффекта Фарадея, не влияющего на среду. Была исследована зависимость спектров спиновых флуктуаций от направления магнитного поля, мощности и длины волны зондирующего света. Наблюдался сигнал с g-фактором 2,6, временами релаксации около 3,2 нс, который приписан отрицательно заряженным точкам. В силу хаотической ориентации и малости кристаллов в стекле материал является оптически и магнитно-изотропным, что и наблюдалось в спектрах.

Было обнаружено, что после засветки образца светом с энергией 1,72 эВ с плотностью мощности около 1 кВт/см² в течение нескольких минут, сигнал спиновых флуктуаций изменялся: появлялся сигнал с g-фактором –0,2, соответствующий дыркам [3], а сигнал электронов уменьшался по амплитуде. Это позволяет утверждать, что исходно зондируемые точки заряжены отрицательно, а при засветке более коротковолновым светом происходит перезарядка некоторых из них. Данный эффект устойчив к нескольким циклам заморозки до гелиевых температур и отогрева до комнатных. Кроме того, было обнаружено действие эллиптически поляризованного света на образец, приписанное динамической ядерной поляризации.

Работа выполнена в рамках мегагранта Министерства образования и науки №075-15-2022-1112 «Создание лаборатории кристаллофотоники» с ведущим учёным К. Стомпосом.

1. Jahangeer Khan, Ihsan Ullah, Jianyu Yuan. CsPbI₃ Perovskite Quantum Dot Solar Cells: Opportunities, Progress and Challenges // *Material Advance* **3**(4) – 2021.

2. Kolobkova, E.; Kuznetsova, M.; Nikonorov, N. Perovskite CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) Nanocrystals in fluorophosphate glasses. // *Journal of Non-Crystalline Solids* 2021, **563**, 120811.

3. Kirstein, E.; Yakovlev, D.; Glazov, et al. M The Land'e factors of electrons and holes in lead halide perovskites: universal dependence on the band gap. // *Nature Communications* 2022, **13**.

П.П. Теслина (студ., 1 курс маг., СПбГУ, каф. ФТТ),
Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. фотоники)

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЕРОВСКИТНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CsPbBr₃ ВО ФТОРФОСФАТНОЙ СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЕ

Высокая эффективность преобразования энергии галогенидными перовскитными материалами уже на протяжении многих лет представляет особый интерес для научного сообщества. Однако галогенидные перовскиты обладают значительным недостатком – низкой устойчивостью к высокой температуре и влажности. Поэтому создание стабильных нанокристаллов перовскитов считается актуальной задачей и по сей день. Возможным решением этой проблемы может стать формирование квантовых точек перовскитов в стеклянной матрице. В такой конфигурации перовскиты защищены от неблагоприятных условий окружающей среды.

В данной работе исследовались квантовые точки перовскита CsPbBr₃ во фторфосфатной стеклянной матрице (40P₂O₅–40BaO–20AlF₃). При синтезе образца использовался метод быстрого охлаждения расплава. Были получены спектры фотолюминесценции исследуемого образца в диапазоне температур от близких к абсолютному нулю до комнатной. В полученных данных наблюдается синий сдвиг фотолюминесценции, а также наличие нескольких полос. Низкотемпературные исследования упрощают анализ механизмов излучения, поскольку в таких условиях отсутствуют температурные колебания.

Было установлено, что положение линии люминесценции с повышением температуры для трехмерных перовскитов смещается в высокоэнергетичную область быстрее, нежели для квантовых точек.

Кроме того, в работе присутствует анализ стабильности излучения фотолюминесценции образца под действием непрерывного и импульсного монохроматического излучения. Результаты могут быть полезны при установлении операционной стабильности устройств, при создании которых использовался схожий материал.

Помимо этого, в работе определяется размер и разброс размеров квантовых точек исследуемого образца с использованием уравнения Шредингера.

Авторы выражают благодарность ресурсному центру "Нанопотоника" за предоставленное оборудование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Мегагрант №075-15-2022-1112).

А.С. Фунтикова (студ., 2 курс маг., СПбПУ, ВИФШ),
А.М. Можаров (к.ф.-м.н., с.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),
А.В. Павлов (к.ф.-м.н., м.н.с., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ GaP/GaPNAs

Современные системы оптической связи требуют мощных и эффективных источников лазерного излучения. На сегодняшний день наиболее активно используются лазеры на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, в особенности в вертикально-излучающей геометрии, но они имеют ряд значительных ограничений: высокая технологическая сложность, низкая термическая устойчивость и плохая совместимость с кремниевой технологией. Перспективной альтернативой являются структуры на базе системы твердых растворов AlGaPNAs, которые обладают аналогичными спектральными характеристиками, но решают проблему совместимости с кремниевыми подложками, что говорит о возможности создания гибридных оптоэлектронных устройств, интегрируемых в существующие оптические системы [1]. Кроме того, благодаря своей хорошей устойчивости к сильным электрическим полям, такие структуры могут быть использованы в схемах, где требования к надежности и долговечности особенно высоки.

Помимо тонкопленочного исполнения структуры на основе системы материалов AlGaPNAs возможно изготавливать в форме нитевидных нанокристаллов (ННК), использование которых потенциально может решить технологические проблемы, связанные с изготовлением вертикально-излучающих лазеров. Благодаря высокой добротности оптических мод в ННК, а также возможности расположения активной области вдоль оси роста, становится возможным избежать использования брегговских отражателей и увеличить объем активной области при сохранении компактных размеров по сравнению с лазерами, выполненными на основе GaAs/AlGaAs. Дополнительно, зеркальные боковые грани ННК обеспечивают эффективную селекцию поперечных оптических мод. Таким образом, создание вертикально-излучающих лазеров на основе ННК характеризуется меньшей технологической сложностью, чем для традиционных планарных аналогов.

В данной работе был проведен численный расчет процесса лазерной генерации в нитевидных нанокристаллах GaP/GaPNAs. Исследован модовый состав оптического резонатора на основе ННК, направленность излучения мод разных порядков, а также влияние эффекта Парселла на эффективность излучения в структуре. Проведен анализ зависимости пороговой мощности накачки, эффективности, а также мощности генерации лазерного излучения от способа размещения активной области в ННК и эффективности перекрытия активной области и оптических мод ННК.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (грант гос. задания FSEG-2024-0017).

1. L.N. Dvoretckaia et al., *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **206**, 110282 (2020).

Н.О. Михайленко (студ., 2 курс маг., СПбПУ, ВШФФИ), С.В. Некрасов (к.ф.-м.н., м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ), М.Д. Рогоза (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ), Ю.Г. Кусраев (д.ф.-м.н., проф., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ)

АНИЗОТРОПИЯ ВРЕМЕНИ СПИНОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ InP/(In,Ga)P

Исследовалась анизотропия спиновой релаксации электронов в квантовых точках (КТ) InP/(In,Ga)P путём изучения зависимости отрицательной циркулярной поляризации (ОЦП) фотолюминесценции (ФЛ) КТ от магнитного поля. В наклонном относительно среднего спина электронов поле наблюдалось отклонение зависимости от изотропного случая, когда релаксация носителей происходит под действием случайных эффективных ядерных полей. Указанные особенности могут быть связаны с анизотропией g-фактора или времени спиновой релаксации; при помощи неупругого рассеяния света с переворотом спина определено, что g-фактор электрона изотропен и равен 1.519 ± 0.005 .

Объектом исследования являются КТ InP/(In,Ga)P, имеющие большие латеральные размеры, около 130 нм, и высоту 20 нм. В низкоэнергетичной части спектра ФЛ наблюдается отрицательная степень циркулярной поляризации ($-5,2\%$). В КТ ОЦП обычно наблюдается при рекомбинации трионов X^- – комплексов, состоящих из двух электронов и дырки [1]. Магнитополевые зависимости ОЦП ФЛ в случае триона X^- определяются электронным спином [1].

Ансамбль КТ InP/(In,Ga)P изучался методом оптической ориентации спинов в зависимости от наклона магнитного поля относительно среднего спина поляризованным светом электронов (угол θ между направлением спина и поля). В пределе больших магнитных полей с отклонением от геометрии Фарадея наблюдается уменьшение по модулю степени циркулярной поляризации ФЛ, в поперечном магнитном поле ($\theta = 90^\circ$) деполаризация ФЛ достигает 0,6%. Отметим, что уменьшение поляризации с углом происходит быстрее, чем ожидается для случая изотропного времени релаксации спина.

В работе рассматривается теоретическая модель, согласно которой на спин электрона действуют внешнее магнитное поле и «замороженные» случайные ядерные поля, помимо этого вводится дополнительный анизотропный механизм спиновой релаксации. Полученное в рамках модели выражение для поляризации в пределах больших полей хорошо описывает экспериментальные данные при соотношении времен спиновой релаксации $\frac{\tau_{sz}}{\tau_{sx}} = 9$.

Таким образом определено, что релаксация компоненты спина вдоль оси роста КТ (ось z) замедлена относительно релаксации в плоскости. Стабилизация спина электрона вдоль оси z может происходить за счет обменного взаимодействия со спином тяжелой дырки в тёмном экситоне с последующей его излучательной рекомбинацией через формирование триона X^- .

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ №22-12-00125.

1. Джиоев Р.И., Физика твердого тела. – 1998. – Т. 40, № 9. – С. 1745 – 1752.

А.А. Живописцев (асп., 1 год, ИОФ РАН),
А.М. Ромшин (м.н.с., ИОФ РАН),
Д.Г. Пастернак (м.н.с., ИОФ РАН),
Д. Калашников (н.с., IMRE Singapore),
Р.Х. Баграмов (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФВД),
В.П. Филоненко (к.т.н., в.н.с., ИФВД),
И.И. Власов (к.ф.-м.н., зав. лаб., ИОФ РАН)

УЗКОПОЛОСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ «КРЕМНИЙ–ВАКАНСИЯ» В НАНОАЛМАЗАХ, ПОМЕЩЕННЫХ В КОЛЬЦЕВОЙ МИКРОРЕЗОНАТОР

В качестве материальной платформы для разработки и создания источников одиночных фотонов предлагается использовать алмазные наночастицы, содержащие одиночные примесные центры «кремний–вакансия» (SiV). Эти центры обладают яркой и фотостабильной флуоресценцией со спектральной шириной ~5 нм в ближнем инфракрасном диапазоне (738 нм) при комнатной температуре [1]. В настоящей работе мы показываем, что интеграция алмазной наночастицы, содержащей ансамбль SiV-центров, с фотонной интегральной схемой на основе кольцевого микрорезонатора приводит к десятикратному уменьшению ширины линии SiV-флуоресценции. Микрорезонатор представлен волноводным кольцом из Si₃N₄, имеющим радиус от 2 до 10 микрон, ширина кольца ~500 нм, высота ~250 нм. На расстоянии ~200 нм от резонатора находится линейный волновод из Si₃N₄ [2]. Рассчитанная добротность резонатора составляет Q = 10000. Флуоресценция алмазной наночастицы с ансамблем SiV-центров, размещенной вблизи резонатора методом “pick and place”, возбуждается конфокально на длине волны 640 нм, в то время как регистрация осуществляется через торец линейного волновода. Измерены кривые насыщения и спектры флуоресценции. Установлено, что добротность флуоресцентных пиков составляет 2000, а их ширина – 0.4 нм. Полученные результаты демонстрируют перспективность предлагаемой интегральной схемы в комбинации с флуоресцирующими наноалмазами для решения актуальных задач квантовой оптики.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 22-19-00324.

1. Bradac C. et al. Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond //Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 5625.
2. Kalashnikov D. A. et al. Tuning of silicon nitride micro-cavities by controlled nanolayer deposition //Scientific Reports. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 15074.

Ю.М. Кузнецов (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, каф. ФПЭН),
М.В. Дорохин (д.ф.-м.н., в.н.с., НИФТИ ННГУ),
Н.В. Байдусь (к.ф.-м.н., с.н.с., НИФТИ ННГУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InGaAs/GaAs

Термоэлектрики – материалы, преобразующие тепловую энергию в электрическую. Эффективность преобразования энергии описывается термоэлектрической добротностью $ZT = \alpha^2 T / \rho \lambda$, где α – коэффициент Зеебека, T – средняя температура горячей и холодной граней, ρ – удельное сопротивление, λ – теплопроводность. Для достижения $ZT = 1,0$ необходимо одновременно высокое значение α и низкие значения ρ и λ . Основная трудность заключается в невозможности независимого управления коэффициентами α , ρ и λ в объёмных твёрдых телах. Таким образом, появился большой практический и фундаментальный интерес в исследовании термоэлектрического эффекта тонких плёнок, где толщина слоя является дополнительной степенью свободы в управлении параметрами ZT .

Практический интерес заключается в решении широкого спектра задач питания маломощных устройств, в которых объёмные термоэлектрики малоэффективны. Последние годы появляется всё больше работ, в которых демонстрируется возможность интеграции термоэлектрических плёнок в одежду, фитнес-браслеты, нанесение плёнок на различные функциональные поверхности [1] и т.д.

Фундаментальный интерес вызван изучением особенностей термоэлектрических явлений в квантоворазмерных структурах. Из формулы Мотта [2] известно, что коэффициент Зеебека определяется скоростью изменения функции плотности состояния вблизи уровня Ферми. Ключевой особенностью низкоразмерных структур является отличный от объёмных материалов вид функции плотности состояний. Таким образом, при технологическом подборе положения уровня Ферми возможно существенное увеличение α .

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование термоэлектрических характеристик тонкоплёночных структур, содержащих массивы самоорганизованных квантовых точек InGaAs, сформированных на подложке i-GaAs методом газофазной эпитаксии. Коэффициент α измерялся в вакуумной камере методом направленного градиента температур с использованием термопар К-типа, коэффициент ρ – стандартной 4-контактной схемой. Была подготовлена серия структур, в которой варьировались температура роста и количество слоёв. Приведён анализ влияния квантовых точек на величину коэффициента Зеебека.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках гос. Задания (проект FSWR-2023-0037).

1. X. He et al. *Chem. Eng. J.*, **490**, 151470 (2024).
2. M. Cutler, N. F. Mott, *Phys. Rev.*, **181**, 3, 1336 (1969).

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaN
ПРИ СИЛЬНОЙ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Нитрид галлия (GaN) – важнейший материал оптоэлектроники, применяемый в качестве активной области светодиодов GaN/AlGaIn. Нитридные соединения в форме нитевидных нанокристаллов (ННК) являются предметом активных исследований. Переход от планарной архитектуры оптоэлектронных устройств к геометрии ННК расширяет доступный диапазон составов AlGaIn, уменьшает потери на вывод излучения и позволяет перейти к синтезу на кремниевых подложках [1].

Применение в оптоэлектронных устройствах напряженных квантовых ям позволяет управлять их характеристиками (пороговым током, длиной волны излучения) [2]. Фундаментальным свойством ННК является повышенная механическая прочность [3], что расширяет границы применимости инженерии деформаций для управления их оптическими свойствами. В настоящей работе исследовано влияние сильных (до $|\epsilon_{zz}| \approx 2.5\%$, $|\sigma_{zz}| \approx 6$ ГПа) растягивающих и сжимающих одноосных упругих деформаций вдоль направления роста ННК GaN на их спектры фотолюминесценции (ФЛ). Исследованные ННК были синтезированы с помощью МО-ГФЭ и характеризовались средней длиной 40 мкм и диаметром 0.5–1.5 мкм. Исследовались отдельные горизонтально лежащие ННК на металлической подложке, упруго напряженные путем их латерального изгиба с помощью зонда атомно-силового микроскопа. Для фиксации ННК в напряженном состоянии после удаления зонда были разработаны и успешно апробированы две экспериментальные методики: «зондовая сварка» – точечное приваривание ННК к поверхности путем локального расплавления металлического покрытия зонда в точке контакта с подложкой, и организация латеральной поддержки соседними ННК путем их прецизионного перемещения.

Полученные карты ФЛ напряженных участков ННК выявили корреляцию положения и ширины пика с уровнем и знаком деформации. Деконволюция спектров, проведенная для учета неоднородности деформации и конечного размера пятна лазерной накачки, позволила установить, что в кристаллах данной геометрии можно управлять положением линии ФЛ в пределах как минимум до 30 нм (280 мэВ). Полученные результаты актуальны для разработки лазеров и источников одиночных фотонов на основе ННК с напряженными квантовыми ямами и квантовыми точками GaN.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01082.

1. Li, C., Wright et al. *Nano lett.*, **17**, 1049 (2017).
2. A.R. Adams, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17**, 1364 (2011).
3. M. Hetzl et al., *Nano lett.* **16** 7098 (2016).

В.В. Гришунов (студ., 1 курс маг., СПбГТЭУ «ЛЭТИ», БК ОЭ),
Д.М. Самосват (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Г.Г. Зергя (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

МЕХАНИЗМ МЕЖЗОННОЙ ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИИ В InGaN/GaN СВЕТОДИОДАХ НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ В ПРИСУТСТВИИ ВСТРОЕННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В настоящее время светодиоды (СД) на основе InGaN/GaN являются одними из наиболее важных источников видимого света. В данных структурах существует несколько нерешённых проблем, например, «спад эффективности» при увеличении плотности тока или падение эффективности в зелёной области видимого спектра, а также не до конца исследован процесс межзонной оже-рекомбинации (ОР), которому и посвящено данное исследование. Оно будет актуально и при рассмотрении вопросов, упомянутых выше.

Для начала стоит отметить, что теоретические результаты, полученные для трехмерных материалов, принципиально не применимы к квантовым ямам; наличие гетеробарьеров, снимающих ограничения, накладываемые на процессы взаимодействия между носителями заряда законом сохранения импульса, порождает принципиально отличные от трёхмерного материала беспороговые каналы ОР. В то же время, локализация носителей заряда в области квантовой ямы создаёт неопределённость для компоненты квазиимпульса, перпендикулярной гетерогранице согласно принципу неопределённости Гейзенберга, вследствие чего в данных структурах имеет место квазипороговый процесс.

Рассматривая СД на основе материалов InGaN/GaN, нужно иметь в виду тот факт, что, как правило, они кристаллизуются в структуру вюрцита. А как известно, кристалл со структурой вюрцита не имеет центра инверсии, а значит в квантовой яме на основе InGaN/GaN может присутствовать встроенное электрическое поле, меняющее поведение волновых функций для электронов и для дырок, а именно: перекрытие между электронными и дырочными состояниями становится слабее, это означает что электрическое поле влияет на коэффициенты оже-рекомбинации.

В настоящей работе это влияние было изучено. Был проведён аналитический расчёт функций состояния электронов в рамках трёхзонной модели Кейна и численный расчёт функций состояний дырок в рамках той же модели с учётом воздействия электрического поля. Также в данной работе были найдены выражения для беспорогового и квазипорогового матричных элементов ОР, которые в предельном случае (при отсутствии электрического поля) дают выражения, как при ОР в квантовой яме в отсутствие поля [1]. На основании указанных результатов были построены зависимости коэффициентов ОР как от величины встроенного электрического поля, так и от ширины квантовой ямы, а также были найдены скорости беспорогового и квазипорогового процессов ОР.

1. A. S. Polkovnikov and G. G. Zegrya, Phys. Rev. B **58**, 4039 (1998).

В.И. Войтович (студ., 4 курс бак., НИУ ВШЭ Санкт-Петербург, МЛКО),
Н.Н. Деркач (студ., 4 курс бак., НИУ ВШЭ Санкт-Петербург, МЛКО),
И.С. Махов (к.ф.-м.н., н.с., НИУ ВШЭ Санкт-Петербург, МЛКО)

СВЕРХКОРОТКИЕ ПОЛОСКОВЫЕ МИКРОЛАЗЕРЫ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ, СФОРМИРОВАННЫЕ ТРАВЛЕНИЕМ ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Задача создания миниатюрных лазеров для фотонных интегральных схем, обладающих простотой изготовления и интеграции с другими элементами, становится всё более актуальной. Существующие источники обладают рядом недостатков. Так вертикально-излучающие лазеры требуют высокой точности толщин выращиваемых слоев, имеют большую толщину эпитаксиальной структуры и вертикальный вывод излучения. Микродисковые лазеры характеризуются относительной простотой изготовления, но не обладают направленностью излучения. Поэтому полосковые лазеры с резонатором Фабри-Перо (ФП) могли бы стать альтернативным решением благодаря простой эпитаксиальной структуре и направленному выводу излучения, позволяющему реализовать ввод сигнала в торец волновода. Однако, традиционные методы их изготовления (скалывание граней и напыление высокоотражающих покрытий) несовместимы с интегральной технологией, а широко используемые полупроводниковые материалы не позволяют достичь усиления необходимого для лазерной генерации в коротких ($L < 100$ мкм) полосках.

В настоящей работе исследованы ФП-лазеры с длиной резонатора от 250 до 50 мкм с зеркалами, сформированными фокусированным ионным пучком (ФИП). Активная область представляет собой 6 рядов квантовых точек (КТ) InGaAs, формируемых не по механизму Странского–Крастанова, обладающих высоким насыщенным усилением [1], что позволяет компенсировать рост потерь в столь коротких резонаторах. При комнатной температуре лазерная генерация возникала при всех исследованных длинах резонатора при импульсном режиме питания. При этом вплоть до наименьшей длины резонатора лазерная генерация происходит также на моде ФП, а не на замкнутой моде, о чем свидетельствует межмодовый интервал (около 2.8 нм для 50-мкм лазера). Пороговая плотность тока при этом составила всего 3.5 кА/см². Длина волны генерации демонстрирует синее смещение при уменьшении длины полоска, что обусловлено ростом оптических потерь, без перескоков на возбужденные оптические переходы КТ. Лазеры со сколотыми гранями ($L \geq 100$ мкм) и ФИП-зеркалами демонстрируют схожие пороговые и спектральные характеристики, что говорит о близком значении коэффициентов отражения граней в обоих случаях. Наибольшие оптические потери оценены равными 240 см⁻¹, что соответствует насыщенному модовому усилению не менее 40 см⁻¹ на один слой КТ. В результате нами достигнута генерация для длины полоска всего 50 мкм, что, насколько нам известно, является наименьшим значением длины резонатора полосковой конструкции без отражающих покрытий, при этом предложенный метод изготовления совместим с планарной технологией.

1. A.M. Nadtochiy et al., *J. Lightwave Technol.* **39**(23), 7479–7485 (2021).

О.Д. Зырянова (студ., 1 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
С.С. Налимова (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАНОКОМПОЗИТОВ WO_x/WS_2 ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И УФ-ИЗЛУЧЕНИИ

Полупроводниковые газовые сенсоры широко используются в промышленности, медицине и экологическом мониторинге. Одной из наиболее важных задач в сенсорике является уменьшение рабочей температуры прибора, что возможно благодаря оптимизации наноструктур, модификации поверхности катализаторами, изготовлению гибридных или композиционных наноструктур и использованию ультрафиолетового или видимого света. Целью данной работы является разработка метода гидротермального синтеза композитных наноструктур WO_x/WS_2 для создания сенсорных слоев, функционирующих при комнатной температуре, а также исследование влияния УФ-облучения на газочувствительные характеристики разработанных слоев.

Полученная в результате гидротермального синтеза композитная наноструктура WO_x/WS_2 была исследована методом растровой электронной микроскопии и представляет собой неупорядоченные 1D и 2D нанообъекты, ориентированные под разными углами относительно подложки. Их средняя длина составляет порядка 200 нм. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия подтверждает, что образец содержит оксид вольфрама нестехиометрического состава, а также дисульфид вольфрама.

Наноструктура продемонстрировала отклик к парам этанола и изопропилового спирта с концентрацией 1000 мд и ацетона с концентрацией 2000 мд при температуре 22–25°C. Отклик образца при использовании УФ-облучения возрастает к парам изопропилового спирта и этанола. Время отклика и восстановления образца, на который воздействуют парами изопропилового спирта и облучают УФ-излучением, уменьшилось примерно в три раза по сравнению с образцом, не облучаемым ультрафиолетом. В остальных случаях изменение рабочих параметров незначительно или отсутствует. Использование УФ-излучения приводит к лучшей обратимости изменений сопротивления чувствительных слоев. При работе сенсорных слоев с использованием УФ-светодиода, имеющего длину волны 370 нм, генерируются неравновесные носители заряда. Следовательно, возрастает адсорбционная способность материала, то есть увеличивается концентрация ионов кислорода, которые адсорбируются на поверхности полупроводника, что положительно влияет на отклик газоаналитического прибора.

Композитные наноструктуры WO_x/WS_2 , синтезированные гидротермальным методом, детектируют наличие паров различных газов при комнатной температуре, следовательно, сенсорные слои не требуют нагревания, что удешевляет и упрощает производство газоаналитических приборов. Использование УФ-излучения в ряде случаев улучшает рабочие характеристики устройства.

Я.Д. Кириленко (маг., 2 курс, Университет ИТМО, институт ПСПД),
М.С. Ружевич (асп., 4 год, Университет ИТМО, институт ПСПД),
К.Д. Мынбаев (д.ф.-м.н., Университет ИТМО, институт ПСПД)

ВЛИЯНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ В БАРЬЕРНЫХ СЛОЯХ InAsSb(P) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ InAsSb-СВЕТОДИОДОВ

Светодиоды (СД) на основе InAsSb используются для создания источников излучения, работающих в среднем инфракрасном диапазоне спектра (длины волн 3–6 мкм). Активная область из *n*-InAsSb в таких СД часто заключена между подложкой из InAs или GaSb и барьерным слоем из *p*-InAsSb(Ga,P), а рекомбинация носителей заряда должна происходить вблизи *n-p* гетерограницы. На практике, однако, энергия кванта излучения в подобных СД не всегда соответствует ширине запрещенной зоны активной области, особенно при пониженных температурах [1]. Причиной этого является доминирование интерфейсного и/или примесного [2] механизмов рекомбинации над межзонным из-за особенностей формирования гетерограницы. Они определяются рассогласованием параметров кристаллической решетки InAsSb и InAsSb(Ga,P), а также спецификой осаждения InAsSb(Ga,P) на InAs(Sb) в методе газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (МОГФЭ). Эти факторы ведут к разупорядочению барьерного слоя – отклонению его состава от номинального [2] и неоднородности состава по толщине [3]. Учёт данных особенностей важен при разработке гетероструктур для СД.

В работе будут представлены результаты изучения влияния свойств барьерных слоёв из твердых растворов InAsSb(Ga,P) на спектральные и электрические характеристики InAsSb-СД. В температурном интервале $T = 11–300$ К было проведено исследование электролюминесценции (ЭЛ) и вольт-амперных характеристик (ВАХ) СД с активной областью из InAsSb и барьерными слоями InAsSb(Ga,P) различного состава. Также исследовались оптическое отражение и фотолюминесценция слоёв InAs, InAsSbP и InAsGaSb, осажденных на InAs и InAsSb. Химический состав слоёв исследовался методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) на электронных микроскопах TESCAN MIRA 3 и FEI Quanta 200, их структурные свойства — на установке ДРОН-8.

По результатам исследований определено влияние содержания InSb в InAsSb на отклонение фактического состава барьерного слоя InAsSbP от номинального, оценено структурное совершенство слоёв InAs(Sb,P) различных составов и определено влияние их свойств на формирование спектра излучения СД, в т.ч., стимулированного.

1. M.S. Ruzhevich et al., *St. Petersburg State Polytech. Univ. J. Phys. Math.*, **17**(1.1), 77 (2024).
2. В.В. Романов и др., *ФТТ*, **65**, 1707 (2023).
3. К.Д. Моисеев и др., *ФТТ*, **58**, 2203 (2016).

А.Д. Малевская (асп., ФТИ им. А.Ф. Иоффе), М.А. Минтаиров (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), В.В. Евстропов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Д.А. Малевский (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), А.В. Малевская (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Н.А. Калюжный (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТАЛЬНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются ключевым компонентом современной оптоэлектроники, обеспечивая эффективное преобразование излучения в электричество. Одним из важных аспектов повышения эффективности ФЭП является оптимизация параметров их контактной сетки, которая отвечает за сбор и транспортировку генерируемого тока. Кроме того, вид контактной сетки также влияет на оптические потери.

Ключевым фактором, влияющим на эффективность ФЭП, является баланс между резистивными и омическими потерями. Так уширение металлических контактов уменьшает резистивные потери, но повышает омические потери за счет увеличения затенения поверхности ФЭП. Для получения ФЭП с максимальной эффективностью требуется определить такие параметры контактной сетки, при которых достигается компромисс между обоими видами потерь.

Ранее авторами была разработана модель [1–3] для описания растекания тока в ФЭП. Было показано, что модель адекватно описывает экспериментальные данные и позволяет определять параметры ФЭП, влияющие на растекание тока под контактной сеткой. В данной работе модель была дополнена расчетом коэффициента затенения поверхности контактной сеткой. Расширенная модель была применена для поиска оптимальной толщины контактной сетки AlGaAs/GaAs ФЭП с КПД более 59% (при мощности лазерного излучения ~ 60 Вт/см², длина волны 800 нм).

Был проведен анализ вольт-амперных характеристик исследуемого ФЭП, найдены величины токов насыщения, сопротивления контактов, сопротивления слоя растекания, вертикального сопротивления структуры и коэффициент затенения. Использование этих параметров в моделировании показало, что оптимизация контактной сетки может повысить эффективность исследуемого ФЭП на 0.9% при уменьшении ширины металлических контактов с 8 мкм до 4 мкм.

1. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, ФТП 50 (7) (2016) с. 987-992.

2. А.Д. Малевская, Растекание тока в солнечных элементах: трёхпараметрическая трубковая модель//Углеродные и ван-дер-ваальсовы наноструктуры (2024) с.82-83.

3. А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, Н.А. Калюжный, Трёхпараметрическая трубковая модель растекания тока в солнечных элементах, конф. Физика СПб, принята к печати.

А.А. Образцова (студ., 2 курс маг., ИТМО, ФФ),
И.А. Мельниченко (асп., 3 год, СПбАУ, лаб. Нанопотоники),
И.С. Махов (к.ф.-м.н., НИУ ВШЭ – СПб, МЛКО)

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Микродисковые лазеры с квантовыми точками (КТ) благодаря своим компактным размерам, высокой добротности поддерживаемых мод шепчущей галереи (МШГ) и возможности достижения низкопороговой лазерной генерации [1] интересны в качестве источников когерентного излучения в различных микро- и оптоэлектронных приложениях.

При однородной накачке высокодобротный микрорезонатор поддерживает множество МШГ, характеризующихся различными азимутальным и радиальным порядками [2]. Каждая МШГ имеет уникальное пространственное распределение электромагнитного поля, что позволяет производить их селекцию (подавление или усиление) в микрорезонаторах, например, посредством введения локальных дефектов [3], однако такой метод, как правило, ведет к росту порога генерации. Нульмерная локализация носителей заряда в КТ приводит к резкому подавлению латерального транспорта носителей заряда в активной области, в результате чего при пространственно неоднородной накачке реализуется неоднородное распределение неравновесных носителей заряда, что может быть использовано для селекции МШГ, а также для спектрального переключения линии генерации микролазера.

В настоящей работе впервые исследованы спектры лазерной генерации микродисков с КТ InAs/InGaAs при пространственно неоднородном оптическом возбуждении. На примере микродиска диаметром 10 мкм изучено влияние положения пятна накачки на его спектры излучения. Обнаружено, что в зависимости от радиального положения пятна оптического возбуждения наблюдается спектральное переключение линии генерации микродискового лазера более чем на 25 нм (с длины волны 1285 нм на длину волны 1313 нм при возбуждении в центре и ближе к периферии резонатора, соответственно). При этом такое спектральное переключение не приводит к заметному изменению порога лазерной генерации. Азимутальный и радиальные порядки МШГ, участвующих в генерации, были определены с помощью ближнепольной оптической микроскопии, а также был проведен теоретический расчет модового состава излучения микродиска.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность переключения длины волны генерации микродискового лазера на величину около 28 нм за счет изменения пространственной области возбуждения на расстояние в несколько микрометров.

1. L. He et al., *Las. Photon. Rev.*, **7**(1), 60–82 (2013).
2. A.B. Matsko et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, **12**(1), 3–14 (2006).
3. A.A. Bogdanov et al., *Opt. Lett.*, **40**(17), 4022–4025 (2015).

А.А. Пуговкин (лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
С.В. Левин (инж., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.Е. Иванов (и.о. 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)

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ p-i-n ДИОДОВ ОТ СОСТАВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ БАЗОВЫХ СЛОЕВ

Интерес к высоковольтным (блокирующим сотни вольт) структурам на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ обусловлен поиском альтернативных кремнию материалов импульсной силовой электроники, способных работать в мегагерцовом диапазоне частот повторения импульсов и при более высоких температурах, до 350 °С и выше [1].

В работе исследовались статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) и обратное восстановление $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ диодов с высоковольтными плавными p^0-i-n^0 -переходами $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с x от 0 до 0.6 и y от 0 до 0.2, толщиной от 25 до 60 мкм, изготовленными методом жидкофазной эпитаксии за счет автолегирования фоновыми примесями. Ранее в [1] было показано, что при увеличении рассогласования по параметру решетки слоя твердого раствора и подложки GaAs, то есть при увеличении содержания Sb в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ до 0.02–0.05, происходит уменьшение до единиц наносекунд времени обратного восстановления (t_{tr}) высоковольтных диодов на их основе, предположительно, за счет образования в слое квазиоднородной сетки дислокаций несоответствия. В данной работе было выяснено, что при дальнейшем увеличении значений y в слое не происходит существенного уменьшения значений t_{tr} , но при этом существенно (до 5–10 раз) уменьшаются максимальные значения блокирующих диодами напряжений, что мы связываем с возможной перестройкой образующихся в растущем слое ячеек сетки дислокаций с прямыми границами в ячеистую дислокационную структуру с плотными границами. При увеличении значений y в слое более 0.05 были также отмечены изменения ВАХ диодов – наблюдалось некоторое увеличение диффузионной компоненты тока, обусловленное, по всей видимости, уменьшением времени жизни носителей, и более раннее ограничение тока последовательным сопротивлением базы вследствие увеличения ее сопротивления. С увеличением ширины запрещенной зоны базового слоя (при увеличении значений x) ожидаемо повышаются рабочие температуры диодов от ~ 250 °С при $x = 0$ до ~ 380 °С (и более) при $x \sim 0.6$, при этом увеличиваются прямые падения напряжения диодов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00245, <https://rscf.ru/project/23-29-00245/>.

1. F. Yu. Soldatenkov et al., St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1.1), 155 (2024).

Н.А. Свинкин (студ., 2 курс маг., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),
В.М. Кондратьев (м.н.с., лаб. ОГСиОМ, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова),
А.Д. Большаков (д.ф.-м.н., директор, центр фотоники и двумерных материалов, МФТИ)

СЕНСОРИКА КИСЛОТ И ЩЕЛОЧЕЙ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Кремниевые наноструктуры, такие как нитевидные нанокристаллы (ННК) Si, ввиду большой адсорбционной емкости в сочетании с технологичностью обладают потенциалом использования в сенсорике [1]. Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию взаимодействия ННК Si с парами водных растворов аммиака и соляной кислоты в свете возможности создания газовых сенсоров на их основе.

В работе использовались нитевидные нанокристаллы кремния длиной около 10 мкм и диаметром поперечного сечения около 250 нм, которые были получены путем травления пластины кремния марки КДБ12 в направлении (100) по методике, описанной в [2]. Полученные ННК Si после обработки ультразвуком были перенесены на кварцевую подложку капельным методом. С привлечением методов лазерной литографии, электронно-лучевого осаждения и вакуумного термического напыления металлов к одиночным ННК были сформированы омические контакты Ni/Au [3]. Визуально контроль качества образцов оценивался при помощи оптического микроскопа Vistek INM 100. Исследование электрических свойств осуществлялось в цепи постоянного тока при помощи источника-измерителя Keithley 2401. Установлена зависимость электрических свойств одиночных ННК от состава паров аналита, а также начальная зависимость от времени экспозиции.

Квантовохимическое моделирование взаимодействия молекул паров аналита с поверхностью ННК выполнялось с применением пакета ORCA 4.2.1 методом wB97X-D3/6-31G. Обработка и визуализация результатов моделирования осуществлялась при помощи программных пакетов Chemcraft, MultiWFN и VMD. По результатам моделирования установлен факт перераспределения электронной плотности между молекулой адсорбата и поверхностью ННК, оценена величина перенесенного заряда и энергия адсорбции.

При сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными данными были оценены коэффициенты прилипания молекул NH₃, H₂O и HCl к поверхности ННК, посредством которых была показана пригодность модели для оценки электрических свойств ННК кремния при адсорбции паров водных растворов аммиака и хлороводорода.

Результаты данной работы могут быть использованы для создания чувствительного элемента газового сенсора NH₃ и HCl на основе кремниевых ННК.

1. S. Oda, D. Ferry (ed.), *Silicon nanoelectronics* (Boca Raton, CRC press, 2017).
2. V. M. Kondratev et al., *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 9940-9949 (2022).
3. А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник (М., Радио и связь, 1975).

П.Ю. Авдеев (асп., 1 год, РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),
Е.Д. Лебедева (асп., 1 год, РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),
А.В. Горбатова (м.н.с., РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),
А.А. Климов (к.ф.-м.н., с.н.с., РТУ МИРЭА),
Н.С. Гусев (вед. технолог, ИФМ РАН, отдел физики магнитных наноструктур),
М.С. Сапожников (д.ф.-м.н., в.н.с., ИФМ РАН, отдел физики магнитных наноструктур),
А.М. Буряков (к.ф.-м.н., с.н.с., РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники)

ТЕРАГЕРЦЕВЫЙ ЭМИТТЕР НА ОСНОВЕ Со/Мо С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УПРАВЛЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ И ПОВОРОТОМ ПОЛЯРИЗАЦИИ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

Применение терагерцевого (ТГц) излучения в медицине, визуализации и безопасности [1] требует эффективных источников, таких как спинтронные эмиттеры [2]. Они позволяют управлять поляризацией и амплитудой ТГц излучения внешним магнитным полем [3]. Управление поляризацией ТГц излучения позволяет использовать спинтронные эмиттеры для поляризационных методик диагностики наноструктур в ТГц диапазоне [4].

В нашей работе мы исследуем спинтронный генератор Со/Мо. Эксперимент проводился при помощи методики терагерцевой спектроскопии временного разрешения (THz-TDS) в геометрии на пропускание. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [5].

Исследуемый спинтронный эмиттер создан методом магнетронного напыления слоев Со и Мо толщиной 3 нм на подложку SiO₂. В процессе напыления прикладывалось магнитное поле напряженностью 1,5 кЭ в плоскости образца для формирования одноосной магнитной анизотропии. Наличие анизотропии было подтверждено при помощи экваториального эффекта Керра.

Амплитуда электрического поля ТГц излучения достигала величины 3,3 кВ/см, а ширина спектра, ограниченная чувствительностью детектирующего кристалла ZnTe, составила 3,0 ТГц. Показана глубина модуляции ТГц амплитуды 70% при изменении направления магнитного поля, приложенного вдоль оси легкого намагничивания. Также продемонстрировано управление ТГц амплитудой путем поворота плоско-поляризованного возбуждающего излучения накачки. Глубина модуляции ТГц амплитуды при этом варьируется в диапазоне 24–41% в зависимости от величины и направления магнитного поля. Продемонстрировано управление плоскостью поляризации ТГц излучения в диапазоне 0–360° при приложении к спинтронному эмиттеру магнитного поля напряженностью до ±200 Э.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №24-79-10302) и Министерства науки и высшего образования РФ (проект №075-15-2022-1131).

1. Pawar, A. Y. *Drug Invent. Today* **5**, 157–163 (2013).
2. Seifert, T. *et al. Nat. Photonics* **10**, 483–488 (2016).
3. Khusyainov, D. *et al. Sci. Rep.* **11**, 697 (2021).
4. Watanabe, S. *Photonics* **5**, 58 (2018).
5. Buryakov, A. M. *et al. Appl. Phys. Lett.* **123**, 082404 (2023).

М.А. Аникина (инж., МФТИ, лаб. ФН),
А. Кузнецов (м.н.с., МФТИ, лаб. ФН), В.А. Шаров (ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
А. Абрамов (инж., ИТМО, ФТМ), В.М. Кондратьев (м.н.с., МФТИ, лаб. ФН),
А.Д. Большаков (д.ф.-м.н., зав. лаб., МФТИ, лаб. ФН)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ X-РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Нитевидные нанокристаллы (ННК) на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 являются перспективными материалами для создания элементов интегральных оптических схем. Ранее было показано, что благодаря оптическим свойствам ННК GaP выступают в качестве эффективных волноводов для света видимого диапазона [1]. Нитевидная геометрия располагает к уникальным механическим свойствам, а волноводные свойства ННК GaP сохраняются даже при больших радиусах изгиба. Всё это является хорошими предпосылками для создания оптических разветвителей.

В работе представлены результаты численного моделирования и экспериментальной характеристики оптических свойств X-разветвителей на основе ННК GaP. Расчеты проводились методом конечных разностей во временной области по алгоритму \hat{Y} в программном обеспечении Ansys Lumerical. Моделирование показало, что управлять пропусканием структуры возможно за счёт подбора диаметра используемых ННК, изменения длины и ширины зазора в области оптической связи. Для ряда длин волн, соответствующих максимумам пропускания X-разветвителя, были получены карты стационарного распределения электрического поля с наблюдаемыми циклами перекачки энергии сигнала. Также были реализованы экспериментальные образцы X-разветвителей. ННК были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии и механически перенесены на стеклянную подложку со слоем ИТО. Формирование X-образных структур происходило путём передвижения ННК зондом атомно-силового микроскопа. Волноводные свойства элемента подтверждены путём получения оптических изображений разветвителей при засветке каждого из четырёх портов лазером 532 нм и суперконтиннумом. Для последнего случая были получены спектры пропускания выходных портов, которые хорошо согласуются с расчётом. Таким образом, в работе теоретически и экспериментально показано, что на основе ННК GaP могут быть получены эффективные X разветвители, которые могут быть использованы для маршрутизации света, при этом спектральные характеристики определяются геометрией элемента и могут быть существенно изменены.

М.А.А. выражает благодарность Минобрнауки (проект FSMG-2021-0005, соглашение 075-03-2023-106) за поддержку численного моделирования. А.Д.Б. выражает благодарность РФФИ (проект 24-12-00225) за поддержку экспериментальной части работы.

1. A. Kuznetsov, et al., *Small*, **19** (28), 2301660 (2023).

УПРАВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СПИНОВЫХ
СВЕТОДИОДОВ InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt

Спиновые светоизлучающие диоды (ССИД) на основе полупроводников A^{III}B^V с ферромагнитным инжектором являются одними из базовых элементов спинтроники. К настоящему времени функции ССИД реализованы при комнатной температуре в целом ряде работ. Для дальнейшего развития, связанного с их интеграцией в существующие или новые интегральные оптоэлектронные схемы, требуется управление такими функциональными характеристиками ССИД, как остаточная поляризация и магнитное поле переключения. Управление этими характеристиками может быть достигнуто путем модуляции свойств ферромагнитного инжектора.

В настоящей работе исследованы светодиоды на основе полупроводниковых гетероструктур с квантовой ямой In_{0.18}Ga_{0.82}As/GaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках n-GaAs, на поверхности которых методом электронно-лучевого испарения сформированы 1 нм слой диэлектрика Al₂O₃ и тонкая пленка CoPt_x (многослойная структура [Co(a)/Pt(b)]₁₀, где a и b – толщины каждого слоя в нм). Были сформированы четыре образца, различающиеся по составу: (a=2, b=5); (a=3, b=5); (a=4, b=5) и (a=4, b=4).

В работе проведены измерения зависимостей степени циркулярной поляризации электролюминесценции от магнитного поля (P_{EL}), измерения циркулярной поляризации при пропускании (P_T) и отражении (P_R) неполяризованного света от пленки CoPt.

Все зависимости P_{EL} описывают петлю гистерезиса, выходящую на насыщение в полях до 550–1300 Э. Вид кривых $P_{EL}(H)$ определяется магнитополевыми зависимостями намагниченности слоев CoPt_x, что наглядно демонстрирует подобие петель гистерезиса $P_{EL}(H)$ и $P_T(H)$. Для обоих случаев величина коэрцитивного поля (H_c) и поля насыщения (H_s) зависят от выбранного состава. Минимальные значения H_c и H_s получены для образца с наибольшей толщиной слоя Co (a = 4), тогда как изменение содержания Pt слабо влияет на эти параметры. С уменьшением толщины Co значения H_c и H_s монотонно возрастают.

Зависимость $P_R(H)$ также определяется намагниченностью ФМ контакта, а величина поляризации не превышает 0,4%. В силу геометрии эксперимента поляризация отраженного света имеет противоположный знак и, следовательно, снижает значение P_{EL} .

Полученные значения P_{EL} значительно превышают погрешность измерений, что делает сформированные диоды перспективными в системах оптического кодирования информации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-72-00047).

И.Н. Григоренко (асп., 3 год, ИТМО; ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
М.И. Митрофанов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе; НТЦ микроэлектроники РАН),
Д.Н. Николаев, А.В. Лютецкий, А.В. Нащёкин, Г.В. Вознюк, В.П. Евтихийев
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УПРАВЛЕНИЕ ЛАТЕРАЛЬНЫМИ МОДАМИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ ГРЕБЕШКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ЗА СЧЁТ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ЗЕРКАЛ

Полупроводниковые инжекционные лазеры нашли широкое применение благодаря их надежности, компактному размеру и высокой энергоэффективности. Одна из основных задач, стоящих перед разработчиками таких лазеров, – это увеличение излучаемой мощности. В наиболее распространенных инжекционных лазерах гребешковой конструкции увеличение оптической мощности требует расширения волновода в латеральном направлении, что приводит к появлению новых мод высокого порядка. Для подавления многомодовой генерации было разработано множество различных конструкций – внешние резонаторы, выходные зеркала с заданным профилем коэффициента отражения [1], дифракционные решетки в составе резонатора [2], конические волноводы [3], лазерные диоды с селективными внутрирезонаторными потерями [4]. В ряде работ было показано, что в полупроводниках при взаимодействии с высокоэнергетичным пучком ионов возникают радиационные дефекты, служащие центрами безызлучательной рекомбинации. Глубина распространения радиационных дефектов зависит от энергии облучающих ионов. В работе [5] было показано, что при облучении двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs ионным пучком Ga^+ с энергией 30 кэВ радиационные дефекты распространяются на глубину более 900 нм, что приводит к практически полному тушению фотолюминесценции.

В нашей работе представлены результаты исследования воздействия облучения пучком ионов Ga^+ выходных зеркал лазеров гребешковой конструкции как с просветляющим покрытием, так и без него на характеристики лазеров. Лазеры выполнены на основе двойной гетероструктуры раздельного ограничения (РОДГС) AlGaAs/GaAs с активной областью в виде квантовой ямы InGaAs. Обнаружено, что локальное облучение выходных зеркал лазеров обоих типов в области максимума интенсивности латеральных мод приводит к подавлению их генерации. Величина пороговой плотности тока и дифференциальная эффективность лазеров при таком воздействии практически не меняются. Предложенный подход позволяет формировать заданный состав латеральных мод в уже полностью изготовленных лазерных диодах гребешковой конструкции.

1. A. Payusov et al., *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 917, 052035 (2017).
2. M. J. Miah et al., *Appl. Phys. Lett.*, 113, 221107 (2018).
3. R. Ben-Michael et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 6, No. 12 (1994).
4. Christian R. Musil et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 127/ 128 (1997).
5. Г.В. Вознюк и др., *ФТП*, Том 56, Вып. 12 (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ p-i-n ДИОДОВ С Ge(Si) НАНООСТРОВКАМИ
В ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Одной из наиболее быстроразвивающихся областей микроэлектроники является кремниевая фотоника, которая позволяет достичь высокой степени интеграции фотонных и электронных компонент в кремниевых чипах [1]. Несмотря на значительный прогресс в этой области, задача создания источников излучения на основе элементов IV группы остаётся нерешённой. Представляемая работа посвящена исследованию латеральных p^+i-n^+ диодов на основе структур с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами, излучающими в области 1.3–1.6 мкм. Формирование в *i*-области таких светодиодов двумерных фотонных кристаллов (ФК) позволяет достичь значительного (более чем на порядок) увеличения интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) за счёт улучшения вывода излучения на радиационных модах ФК [2]. Ввиду большого числа факторов, оказывающих влияние на интенсивность и вид спектра ЭЛ, необходим совместный подбор оптимальных параметров ФК и p^+i-n^+ диодов.

В настоящей работе с помощью метода спектроскопии микро-ЭЛ с высоким пространственным (~ 1 мкм) и спектральным (~ 0.1 нм) разрешением были проведены сравнительные исследования спектров ЭЛ и профилей пространственного распределения интенсивности ЭЛ вдоль p^+i-n^+ диодов в зависимости от длины *i*-области, параметров ФК и условий возбуждения ЭЛ. Анализ полученных результатов показал, что в спектрах ЭЛ диодов (в отличие от спектров ФЛ) отсутствуют узкие (< 2 нм) линии, связанные с высокодобротными модами ФК. При этом в диодах с короткой *i*-областью (4–10 мкм) интенсивность ЭЛ равномерно распределена по всей нелегированной области, а формирование отверстий ФК слабо влияет на величину тока через диод. Для диодов с большей длиной *i*-области (12–20 мкм) обнаружена существенная неоднородность распределения интенсивности ЭЛ вдоль диода. При этом как сопротивление диода, так и положение максимума интенсивности ЭЛ существенно зависят от напряжения, приложенного к подложке (затвору) диодной структуры. На основании полученных результатов обсуждаются возможности повышения эффективности ЭЛ Ge(Si) наноструктур в ФК, наблюдения в спектрах ЭЛ диодных структур узких линий, связанных с высокодобротными модами ФК, а также практическое применение эффекта перераспределения сигнала ЭЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания ИПФ РАН (FFUF-2024-0019).

1. S. Shekhar, et al. // Nat. Communications, **15**, 751 (2024).
2. V. B. Shmagin, et al. // Nanotechnology, **35**, 165203 (2024).

Я.Н. Ковач (асп., 1 год, ИТМО, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
С.А. Блохин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
М.А. Бобров (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
А.А. Блохин (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Н.А. Малеев (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
А.П. Васильев (н.с., НТЦ микроэлектроники РАН)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ШИРИНУ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОМОДОВЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 89X НМ

В настоящее время увеличивается интерес к созданию компактных квантовых сенсоров на основе атомов щелочных металлов (изотопы ^{133}Cs , ^{85}Ru или ^{87}Ru) с применением инжекционных лазеров для оптической накачки/детектирования [1]. К такого рода источникам лазерного излучения предъявляется ряд особых жестких требований, включая одномодовый режим генерации с фиксированной линейной поляризацией и узкой шириной спектральной линии излучения. Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) открывают широкие перспективы для создания компактных квантовых сенсоров. Следует отметить, что при реализации квантовых компактных сенсоров источники лазерного излучения должны работать при повышенных температурах. В этой связи представляет интерес изучение влияния температуры на ширину спектральной линии (ШСЛ) излучения одномодовых ВИЛ.

В настоящей работе представлены исследования статических, спектральных и поляризационных характеристик ВИЛ спектрального диапазона 89X нм, соответствующего линии D1 в изотопе ^{133}Cs . Конструкция исследуемых ВИЛ детально описана в работе [2]. В диапазоне температур 20–120 °С ВИЛ демонстрирует одномодовую лазерную генерацию с коэффициентом подавления боковой моды более 30 дБ (одночастотный режим) и подавление ортогональной поляризации более 15 дБ во всем диапазоне рабочих токов. Согласно измерениям ШСЛ ВИЛ с помощью конфокального сканирующего интерферометра нелинейное уширение спектральной линии ВИЛ при выходной оптической мощности связано с ростом внутренней температуры лазера. Увеличение температуры ведет к уширению спектральной линии ВИЛ. Более того, наблюдается рост остаточной ширины линии и скорости заужения спектральной линии (linewidth-power фактор). В результате при 20 °С минимальное значение ШСЛ составило ~40 МГц, а при повышении температуры до 120 °С составило ~175 МГц. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования разрабатываемых ВИЛ спектрального диапазона 89X в качестве источника оптического излучения в компактных квантовых сенсорах.

1. J. Kitching, Chip-scale atomic devices, *Applied Physics Reviews*, **5**(3), 031302 (2018).
2. Blokhin S.A. et al., Vertical-cavity surface-emitting lasers for compact atomic sensors, *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*, **16**(3.2), 16–22 (2023).

А. Кузнецов (м.н.с., МФТИ, лаб. ФН),
Е.С. Завьялова (инж., МФТИ, лаб. ФН),
А.Н. Абрамов (инж., ИТМО, ФТМ),
М.А. Аникина (инж., МФТИ, лаб. ФН),
А.Н. Токсумаков (инж., МФТИ, лаб. НиП),
П.А. Алексеев (с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лаб. ОП),
В.М. Кондратьев (инж., СПбАУ РАН, лаб. ОГСиОМ),
Д.А. Казарян (в.н.с., МФТИ, лаб. ПНиКМ),
А.Д. Большаков (зав. лаб., МФТИ, лаб. ФН)

КОМПОНЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОФОТОНИКИ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ InGaS₃

К новым технологиям интегральной фотоники относится разработка базовых наноразмерных компонентов, материал которых должен обладать высоким показателем преломления и быть прозрачным в видимом диапазоне. Данным критериям удовлетворяют тонкие слои не ван-дер-Ваальсового InGaS₃ [1]. В работе исследуется влияние геометрии поперечного сечения на оптические свойства полосковых и щелевых волноводов. Теоретически исследуется влияние формы, размеров поперечного сечения, а также ширины воздушного зазора и наличия материала в зазоре на модовый состав, оптические потери, локализацию поля и спектров пропускания полосковых и щелевых волноводов. Результаты моделирования продемонстрировали отсечку в области коротких длин волн (~500 нм), связанную с краем собственного поглощения, и в области больших длин волн, связанную с модовой делокализацией. Для длины волны 500 нм минимальный размер волновода, для которого сохраняется волноводный эффект, составляет около 105×105, 70×120 и 130×70 нм² для квадратного, горизонтального и вертикального сечения, соответственно. В горизонтальных прямоугольных волноводах показана гибридизация мод [2]. Показано, что увеличение ширины зазора в щелевых волноводах приводит к сужению полосы пропускания, а также к перетеканию моды в плечи волновода в случае их поперечных размеров больше 105 нм, а изменение толщины слоя материала в зазоре позволяет перемещать пучность моды в зазоре, практически не влияя на полосу пропускания. С помощью атомно-силовой литографии и сфокусированного ионного пучка изготовлены полосковые волноводы, топография которых была исследована методами РЭМ и АСМ. С помощью оптической микроскопии и спектроскопии пропускания исследованы их оптические свойства: отсечка вблизи края собственного поглощения соответствует ~500 нм, ширина полосы пропускания составила ~200 нм.

А.К. выражает благодарность Российскому научному фонду (грант 24-22-20064) за поддержку в изготовлении наноструктур, численных расчетах и их характеристике.

1. Toksumakov A. N. et al., npj 2D Materials and Applications, **6**, 1, 85 (2022).
2. Kaushalram A., Hegde G., Talabattula S., Scientific Reports, 10, **1**, 16692 (2020).

Д.В. Коляда (м.н.с., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
И.В. Чуманов (асп., 1 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
О.С. Комков (д.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
В.А. Тимофеев (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН),
И.В. Скворцов (асп., 3 год, м.н.с., ИФП СО РАН)

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР Ge(Si,Sn)/Ge

Интерес к наногетероструктурам на основе кремния привлекает все большее внимание исследователей в связи с их потенциальным применением в создании новых полупроводниковых устройств для работы в среднем инфракрасном диапазоне [1]. Поскольку разработка эффективных светоизлучающих устройств на основе материалов GeSi ограничена из-за непрямой запрещенной зоны, особое внимание уделяется прямозонным материалам на основе элементов IV группы (Ge, Si, Sn), перспективным с точки зрения создания всего комплекса фотонных устройств. В настоящее время удаётся получать излучающие и фотоприёмные структуры на основе $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$, выращиваемые на буферном слое германия большой толщины [2].

Были исследованы диодные структуры, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках $n^+\text{-Ge}$ (100). На подложке формировался слой собственного германия $i\text{-Ge}$ в два этапа: толщиной 90 нм при температуре роста 250 °C и 110 нм – при 350 °C. Далее растился эпитаксиальный слой GeSiSn толщиной 200 нм при температуре 150 °C. Затем слой $i\text{-Ge}$ толщиной 100 нм и последним слой $p^+\text{-Ge}$ толщиной 100–200 нм. Структуры отличались составом эпитаксиального слоя GeSiSn. На основе каждой из структур было создано от 4 до 8 светодиодов. Исследование образцов выполнялось на установке, в основе которой лежит ИК Фурье-спектрометр Vertex 80.

Структуры демонстрируют примерно одинаковое положение сигнала электролюминесценции (ЭЛ) – при $T = 300\text{ K}$ $E_g = 0.67\text{ эВ}$. Образцы продемонстрировали хорошую температурную стабильность: при изменении T от 20 K до 300 K у лучших образцов серии интенсивность ЭЛ уменьшилась всего в 2 раза. Зависимость ЭЛ от подаваемого тока для обеих структур носит сверхлинейный характер: при увеличении тока в 2.9 раза происходит рост ЭЛ в 5.5 раза при большом вкладе составляющей безызлучательной рекомбинации Шокли–Рида–Холла. Это может быть связано с наличием дефектов в структурах вследствие роста на Ge подложке. Поскольку структуры на основе GeSiSn позволяют гибко управлять запрещенной зоной материала в широком диапазоне энергий, это открывает перспективы для создания кремний-совместимых излучающих структур.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ №20-79-10092.

1. R. Soref, *Nature photonics*. **4**, 495 (2010).
2. I. Fischer, *Opt. Exp.* **23**, 25048 (2015).

К.А. Мажукина (асп., 1 год, ИФМ РАН),
В. В. Румянцев (к.ф.-м.н., с.н.с., зав. лаб. ИФМ РАН)

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА В МЕЗАСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ HgCdTe ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ

В последнее время наблюдается возрождение интереса к квантовым ямам (КЯ) HgCdTe как к материалу для активной среды полупроводниковых лазеров среднего ИК диапазона [1, 2]. В настоящей работе исследовались микродисковые лазеры на основе HgCdTe, работающие на длинах волн $\lambda > 3$ мкм при $T > 200$ К и ~ 25 – 20 мкм при температурах в диапазоне от 10 до 70 К в условиях оптической накачки.

В микродисковых резонаторах, рассчитанных на генерацию на длине волны ~ 4 мкм, лазерное излучение наблюдалось до температуры 230 К, в то время как в непроцессированных структурах стимулированное излучение (СИ) сохранялось до 270–290 К. Исследования пороговых зависимостей и температурного гашения фотолюминесценции показали, что влияние дефектов, возникающих в ходе ионного травления, на максимальную рабочую температуру (T_{\max}) микродискового лазера выражено слабо, и T_{\max} контролируется преимущественно оже-процессами в условиях разогрева накачкой и потерями на излучение.

Дисковые микрорезонаторы диаметром 200 мкм и высотой в диапазоне от 3.6 до 8.3 мкм, излучающие на длинах волн ~ 27 – 22 мкм, были сформированы методом ионного травления с использованием алюминиевой маски. Исследования выявили резкий рост порога генерации с 0.5 до ~ 10 кВт/см² с увеличением глубины травления не только для мод микродиска, но и для волноводной моды, которую удается наблюдать для образцов, в которых глубина травления не достигает активной области. Оценки эффективного времени жизни носителей указывают на определяющее влияние возросшей дефектности материала на максимальную температуру и пороговые интенсивности возникновения СИ, увеличение которых приводит к существенному разогреву носителей излучением накачки и дополнительному уменьшению коэффициента усиления.

В непроцессированных структурах, оптимизированных с целью уменьшения радиационных потерь и увеличения пороговой энергии оже-рекомбинации, пороговую плотность мощности накачки удалось снизить до значений ~ 10 Вт/см² и добиться квазинепрерывной генерации при 8–30 К. Таким образом, полученные результаты создают предпосылки для реализации лазеров с оптической накачкой компактными квантово-каскадными лазерами среднего ИК-диапазона при условии улучшения технологии процессинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-72-10111).

1. Morozov S.V., Rumyantsev V. V., *et al.*, ACS Photonics, **8**, 3526-3535 (2021).
2. Rumyantsev V.V., Dubinov, A.A., *et al.*, Applied Physics Letters, **121**, 182103 (2022).

К.В. Машинский (м.н.с., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
 В.В. Попов (д.ф.-м.н., г.н.с., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
 М.Ю. Морозов (к.ф.-м.н., с.н.с., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

ТЕРАГЕРЦЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ГРАФЕН-СОДЕРЖАЩЕМ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЖЕЛОБЕ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

Терагерцевые (ТГц) лазеры востребованы в системах ТГц фотоники [1]. Графен, двумерный материал с уникальными свойствами [2], является привлекательным материалом для активной среды в ТГц лазерах [3].

В данной работе теоретически исследована ТГц лазерная генерация в графен-содержащем диэлектрическом Фабри–Перо резонаторе с оптической накачкой, помещенном на дно металлического желоба шириной L , рис. 1 (а).

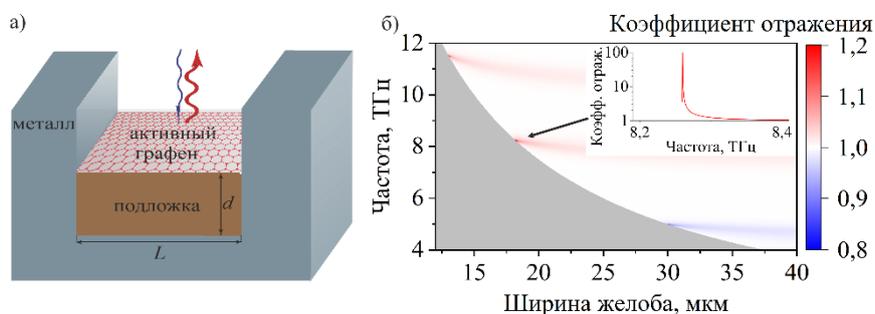


Рис. 1. Схема структуры (а) и спектр отражения падающей волны от ширины желоба (б).

На рис. 1 (б) представлен спектр отражения падающей ТГц волны в зависимости от ширины желоба при $d = 23$ мкм, квази-энергии Ферми 35 мэВ и реалистичном времени рассеяния носителей заряда в графене 0,3 пс [4]. В области положительной действительной части проводимости графена энергия падающей волны поглощается (см. синий лепесток низшего резонанса Фабри-Перо на рис. 1 (б)). Лазерное ТГц излучение возникает в области отрицательной действительной части проводимости графена (от 5 до 33 ТГц при расчетных параметрах) вблизи частоты отсечки падающей ТГц волны при одновременном возбуждении двух резонансов Фабри–Перо: высшего резонанса по толщине диэлектрической подложки и основного резонанса по ширине металлического желоба (красные лепестки на рис. 1 (б)).

Таким образом, показана возможность ТГц лазерного излучения при достаточно малой величине оптически активированной квази-энергии Ферми в графене (меньшей, чем в плоской структуре, рассмотренной в [3]) при реалистичном времени рассеяния носителей заряда в графене, что может быть использовано для создания низкопорогового графенового лазера.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 24-22-00114).

1. X. Li, et al., *Light: Science & Applications*, **12**, 233 (2023).
2. K.S. Novoselov, et al., *Nature*, **490**, 192 (2012).
3. A.A. Dubinov, et al., *Applied Physics Express*, **2**, 092301 (2009).
4. M. Orlita, et al., *PRL* **101**, 267601 (2008).

Г.В. Ненашев (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ОТЭ),
А.Н. Алешин (д.ф.-м.н., зам. зав. отделения, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ОТЭ)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТАНДЕМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, НАНЕСЕННЫХ НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Модификация поверхности *c*-Si солнечных элементов (СЭ) пленками металлоорганических перовскитов считается одним из наиболее перспективных направлений, благодаря высокому коэффициенту поглощения в этих материалах в видимом спектре, возможности формирования многослойных гетероструктур, достаточно высокой подвижности носителей заряда, а также относительно низкой стоимости производства [1]. Наиболее перспективным сочетанием технологичности изготовления и эффективности преобразования энергии являются тандемные СЭ. Тандемный СЭ состоит из двух или более слоев фотоэлектрического материала, нанесенных последовательно (сэндвич-структура), одним из которых является перовскит. Основное различие между обычным перовскитным СЭ (ПСЭ) и тандемным СЭ заключается в их эффективности. Эффективность тандемного СЭ значительно выше, чем обычного ПСЭ, это связано с тем, что тандемная структура поглощает в более широком диапазоне солнечного спектра, в результате чего большая часть солнечной энергии преобразуется в электричество.

В настоящей работе представлены результаты исследования морфологических и электрических свойств многослойных структур, созданных на основе тонких пленок металлоорганических галогенидных перовскитов (organometallic halide perovskites, ОНР), $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, нанесенных на поверхность СЭ на основе кристаллического кремния (*c*-Si). Морфология и электрические свойства данных структур были исследованы методами АСМ, вольт-амперной характеристики и импеданс-спектроскопии. Показано, что исследованные образцы демонстрируют заметную фотопроводимость, причем фотопроводимость образцов с верхним слоем перовскита значительно превышает аналогичные характеристики для СЭ на основе *c*-Si. Это указывает на то, что слой металлоорганического перовскита значительно улучшает фотопроводимость структуры СЭ на основе *c*-Si. Показано, что различия в условиях синтеза перовскитов могут привести к значительным различиям в морфологии поверхности и электрических свойствах образцов.

Полученные результаты позволяют улучшить эксплуатационные характеристики следующего поколения тандемных *c*-Si СЭ с верхними слоями металлоорганических галогенидных перовскитов.

1. S. Jung, J.H. Kim, J.W. Choi, J.-W. Kang, S.H. Jin, Y. Kang, W. Song, *Nanomaterials* **10**, 710 (2020).

Д.С. Папылев (асп., 2 год., ИТМО),
В.В. Дюделев, Е.Д. Черотченко, И.И. Врубель, Д.А. Михайлов, Д.В. Чистяков,
С.Н. Лосев, А.В. Бабичев, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)
И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский (ООО "Коннектор Оптикс", Университет ИТМО)
К.А. Подгаецкий, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая,
М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк (АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха»)
С.А. Чахлов (Физический фак., МГУ им. М.В. Ломоносова,
Филиал МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Саров)
А.Г. Гладышев, А.Ю. Егоров (ООО "Коннектор Оптикс")
Н.А. Пихтин, Г.С. Соколовский (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА

При использовании квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего ИК диапазона для дистанционного детектирования веществ наряду с требованиями к узкой линии лазерной генерации и широкому диапазону спектральной перестройки важно достижение высокой выходной оптической мощности, влияющей на чувствительность систем дистанционного детектирования. Для реализации мощного перестраиваемого ККЛ может использоваться конструкция с внешним резонатором на основе дифракционной решетки.

В настоящей работе показаны результаты исследования характеристик мощного перестраиваемого ККЛ с использованием внешнего резонатора по схеме Литрова [1], расположенного на заднем зеркале ККЛ. В разработанной конструкции используется ККЛ на основе гетероструктуры с напряженно-сбалансированной активной областью $\text{Al}_{0.63}\text{In}_{0.37}\text{As}/\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ [2]. Грани лазера выполнены скалыванием без использования просветляющих покрытий. Обратная связь в лазерном резонаторе обеспечивается путем коллимации излучения собирающей линзой из германиевого сплава на отражающую дифракционную решетку с углом блеска в первом порядке дифракции и шагом 150 мм^{-1} .

Измерение ватт-амперных и вольт-амперных характеристик ККЛ в импульсном режиме при температуре 298 К продемонстрировало максимальную мощность излучения около 1,5 Вт. ККЛ продемонстрировал одномодовый режим лазерной генерации с коэффициентом подавления боковых мод на уровне не менее 10 дБ. Показана возможность непрерывной перестройки длины волны излучения ККЛ в диапазоне более 600 нм, что соответствует более чем 100 см^{-1} .

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 21-72-30020.

1. Y. Ma, et al., *Crystals*, **12**(11), pp.1564, (2022).

2. A.V. Babichev, et al., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **87**, 839–844 (2023).

Д.С. Папылев (асп., 2 год., ИТМО),
С.А. Блохин, К.О. Воропаев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Я.Н. Ковач (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Университет ИТМО),
А.Г. Гладышев, И.И. Новиков, Е.С. Колодезный,
А.В. Бабичев, А.Ю. Егоров, Л.Я. Карачинский (Университет ИТМО)

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ 1550 НМ ПРИ АКЦЕПТОРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Скорость передачи данных в современных телекоммуникационных системах непосредственно зависит от предельной частоты модуляции используемых источников излучения. Фундаментальным ограничением предельной частоты модуляции лазеров является частота релаксационных колебаний, величина которой пропорциональна дифференциальному усилению активной среды [1].

В настоящей работе представлены результаты исследования динамических характеристик вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона 1550 нм при акцепторном легировании активной среды, потенциально ведущим к увеличению дифференциального усиления. Использовались ВИЛ, сформированные методом спекания пластин гетероструктуры активной области (АО) на подложке InP и гетероструктур распределенных брэгговских отражателей на подложке GaAs. Рост гетероструктур производился методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Подробное описание конструкции кристаллов ВИЛ представлено в работе [2].

АО ВИЛ состояла из 10 слоев квантовых ям $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$ толщиной 2,8 нм, разделенных барьерами $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,16}\text{Al}_{0,31}\text{As}$ толщиной 7 нм, в середине которых выполнено дельта-легирование углеродом с поверхностной концентрацией $0,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Также исследовался ВИЛ с АО, выполненной без использования акцепторного легирования.

Лазеры продемонстрировали одномодовое излучение в диапазоне около 1550 нм с пороговым током 2 мА и 1,9 мА в случае нелегированного и легированного ВИЛ, соответственно. В результате использования легирования достигнуто повышение максимальной частоты модуляции с 7,2 ГГц, характерной для нелегированной АО, до 8,9 ГГц при легировании. Однако, наблюдалось снижение максимальной оптической мощности с 5,5 мВт до 3,5 мВт при использовании легирования.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442 (код научной темы FSER-2020-0013).

1. K. Uomi, et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. **51**, no.2, pp. 78-80 (1987).
2. A. Babichev, et al., *Photonics*, vol. **10**, no. 3, p. 268 (2023).

И.В. Самарцев (инж., ННГУ им. Н. И. Лобачевского),
Н.В. Байдусь (к.ф.-м.н., с.н.с., ННГУ им. Н.И. Лобачевского),
С.Ю. Зубков (инж., ННГУ им. Н.И. Лобачевского),
Д.М. Баясников (студ., 2 курс маг., ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

ФОТОДИОДЫ НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 1.55 МКМ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs

Приборы электроники на подложках GaAs представляют интерес для замены используемых сейчас приборов, сформированных на подложках InP [1]. Практическая реализация гетероструктур на GaAs, характеристики которых не уступали бы характеристикам гетероструктур на InP, затруднена неполным подавлением прорастания дислокаций в активные слои структуры и возникновением микрорельефа поверхности. Одним из наиболее перспективных методов перехода от используемых сейчас подложек InP к подложкам GaAs является использование метаморфных буферных слоев с изменяемым составом, которые позволяют плавно перейти к нужной постоянной кристаллической решетки и ширине запрещенной зоны.

В данной работе были изготовлены и исследованы фотодиоды с метаморфным буферным слоем (МБ) на подложке GaAs, имеющие fotocувствительность до 1.65 мкм на уровне 50% от максимума fotocувствительности. Исследуемые фотодиодные гетероструктуры были получены методом МОСГЭ.

Процесс формирования МБ слоя заключался в постепенном увеличении концентрации In по квазикорневому закону от 7 до 53%. Данный слой обеспечивает переход от периода решетки GaAs к периоду решетки $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, а постепенное уменьшение градиента концентрации In позволяет снизить плотность дислокаций вблизи поверхности роста и повысить качество эпитаксиальных слоев. Содержание Al оставалось неизменным на протяжении всей толщины слоя и составило примерно 8%. На основе данных структур изготовлены фотодиоды с диаметром мезаструктуры 1.4 мм с толщинами fotocувствительной области 0.5 и 1 мкм. С целью исследования приборных характеристик получены спектры фототока, ВАХ и значение fotocувствительности на длине волны 1.55 мкм. Спектр фототока имеет максимум на длине волны 1.3 мкм, длина волны 1.55 мкм располагается на уровне 83% максимума интенсивности спектра фототока. Значения fotocувствительности на длине волны 1.55 мкм для фотодиодов с толщинами fotocувствительной области 0.5 и 1 мкм составили 0.53 и 0.6 А/Вт, соответственно, при этом плотность темнового тока при обратном смещении -2 В составила 3×10^{-6} и 3×10^{-4} А/см², соответственно.

Таким образом, технология получения МБ слоев InAlGaAs для InGaAs фотодиодов телекоммуникационного диапазона длин волн, на подложках GaAs является перспективной и может быть использована для создания коммерческих фотодетекторов.

1. Wang Hai-Li, WU Dong- Hai, Wu Bing-peng, et al., CHIN. PHYS. LETT., Vol. **26**, №1 (2009) 014214.

ЛЕГИРОВАННЫЕ КАДМИЕМ ПЕРОВСКИТНЫЕ МИКРОДИСКИ
С ПЕРЕСТРАИВАЕМОМ СОСТАВОМ ДЛЯ СТАБИЛЬНОГО СПОНТАННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Замещение Pb^{2+} на Cd^{2+} в кристаллической решетке неорганических металл-галогенидных перовскитов $CsPbX_3$ ($X=Br, Cl, I$) было представлено как перспективная стратегия для обеспечения контроля над спектром фотолюминесценции (ФЛ), электропроводностью и сегрегацией ионов, индуцированных светом и электрическим полем в легированных составах. Однако, зависимость длины волны спектра люминесценции от содержания кадмия в перовскитных нанокристаллах не была однозначно установлена, и результаты исследований в различных работах противоречат друг другу [1–3].

В данной работе были созданы перовскитные микродиски $CsPb_{1-x}Cd_xBr_3$ ($x = 0-0.2$) путем высокотемпературной перекристаллизации под давлением. Были получены изображения данных структур методами флуоресцентной микроскопии, силовой электронной микроскопии (СЭМ), а также методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Это позволило обнаружить надежную корреляцию между количественными данными об элементном составе микродисков и длиной волны ФЛ таких структур. Были измерены спектры лазерной генерации созданных микродисков при их накачке фемтосекундным лазерным излучением с частотой повторений импульсов 10 кГц, а также изучена фотостабильность спектров спонтанного излучения и лазерной генерации во времени при высокочастотной импульсной накачке. Измерения методом время-разрешенной фотолюминесценции также позволили выявить замедленную излучательную электрон-дырочную рекомбинацию, которую можно объяснить обратимым переносом электронов в $\Gamma \leftrightarrow R$ -точках в зоне проводимости.

Было установлено, что микродиски с низким содержанием Cd показывают быстрое ухудшение ярко-зеленого спектра ФЛ при возбуждении квазинепрерывным лазерным излучением, тогда как высокое содержание приводит к постоянной, однако, малоинтенсивной синей эмиссии. Такая существенная разница во временной стабильности слабо и сильно легированных структур обусловлена сниженной оже-рекомбинацией в последних. Было установлено, что оптимальное содержание $Cd \approx 6\%$ улучшает временную стабильность лазерной генерации в микродисках в 3 раза по сравнению с чистым $CsPbBr_3$.

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 24-73-10072).

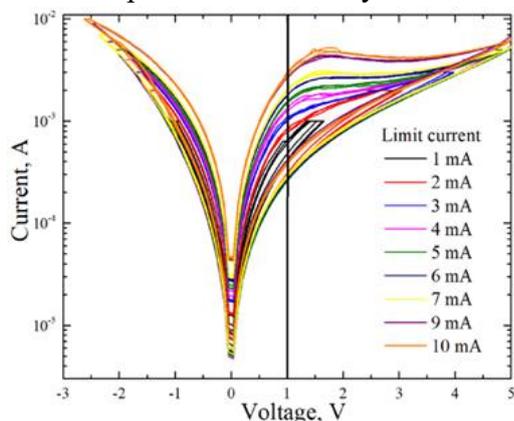
1. M. Imran, et al., *Chem. Mater.*, **32**, 10641–10652 (2020).
2. I.D. Skurlov, et al., *Nanomaterials*, **12**, 151 (2022).
3. J. Guo, et al., *Chem. Eng. J.*, **427**, 131010 (2022).

Ю. Чэн (асп., 2 год, НГУ, каф. ФПП),
 Г.Н. Камаев (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН),
 А.А. Попов (к.ф.-м.н., с.н.с., ЯФ ФТИАН РАН),
 В.А. Володин (д.ф.-м.н., проф., ИФП СО РАН, НГУ, каф. ОФ)

ВЛИЯНИЕ НАНОСЛОЁВ Ge НА ЭФФЕКТ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Мемристоры, изготовленные на основе аморфного кремния (a-Si) или оксидов кремния и металлов, рассматриваются в качестве искусственного синапса для нейроморфных вычислений. Ранее [1–2] были синтезированы мемристоры на основе a-Si с добавлением серебра и меди. Эти мемристоры продемонстрировали многоуровневые резистивные переключения, что позволяет использовать кроссбар-технологии для создания крупномасштабных матриц памяти. Цель этой работы состоит в том, чтобы изучить эффекты переключения в диодных структурах на основе a-Si, в которых присутствуют нанослои Ge.

Образцы были получены методом плазмохимического осаждения на подложках из



стекла, покрытых прозрачным электродом (ITO). Газы SiH₄, GeH₄, B₂H₆ и PH₃ использовались в качестве прекурсоров. Были созданы два различных вида p-i-n структур. Первый образец не содержит Ge, а второй содержал нанослои Ge в нелегированном слое a-Si. Верхний электрод изготовлен из алюминия. Вольтамперные характеристики (ВАХ) измеряли при комнатной температуре с помощью мультиметра Agilent.

ВАХ образца с внедренными в a-Si нанослоями Ge при различных ограничениях по току.

После проведения процедуры «формовки» в изучаемых структурах наблюдаются эффекты переключения в биполярном режиме при развертке напряжения в последовательности +5В→0В→-3В→0В→5В. С введением в i-слой p-i-n структур нанослоев Ge повышается стабильность переключений, структуры демонстрируют многоуровневый характер переключений (см. рис.), свойственный для «аналоговых» мемристоров.

Эксперименты показали воспроизводимые резистивные переключения через промежуточные состояния, что демонстрирует возможность применения диодных структур на базе a-Si/a-Ge в качестве многобитовых или «аналоговых» мемристоров для нейроморфных вычислений.

Работа выполнена при поддержке проектов FSUS-2024-0020 и FWGW-2022-0011.

1. H. Yeon, et al., *Nature Nanotechnology*, **15**, 574 (2020).
2. Д.И. Ичѣткин и др., *ЖТФ*, **49**, 39 (2023).

К.Ю. Шубина (к.ф.-м.н., н.с., СПБАУ РАН, ЛНЭ),
О.А. Сеницкая (асп., 3 год, СПБАУ РАН, ЛНЭ),
Я.Б. Эннс, А.М. Мизеров (СПБАУ РАН, ЛНЭ)

ДЕТЕКТОРЫ БЛИЖНЕГО УФ ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАТОНКИХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaN

Широкозонный полупроводник GaN благодаря своим уникальным свойствам является одним из самых перспективных материалов современной оптоэлектроники, в частности, для создания высокоэффективных фотодетекторов (ФД) ближнего УФ диапазона. Ввиду сложностей и особенностей синтеза III–N материалов, в последнее время внимание исследователей привлекает использование различных эпитаксиальных наноструктур (наноцветы, нанобашни и т.д.), а также ультратонких эпитаксиальных слоев GaN с развитой морфологией поверхности для создания УФ ФД [1].

В настоящей работе методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота были синтезированы ультратонкие (250 нм) нелегированные эпитаксиальные слои GaN на решеточно-рассогласованных сапфировых подложках. Была усовершенствована использовавшаяся ранее конструкция ФД [2]: (1) значительно уменьшена площадь контактных площадок на гребенках, (2) добавлен защитный и пассивирующий слой SiO₂ толщиной 300 нм, (3) предусмотрены верхние Au контактные площадки, соединяющиеся с встречноштыревыми элементами через «окна» в диэлектрике. С применением стандартных подходов фотолитографии были изготовлены УФ ФД на основе перехода металл–полупроводник–металл двух типов: с симметричными контактами Шоттки и фотодиоды Шоттки. Для формирования полупрозрачных контактов Шоттки использовалась металлизация Ni/Au, вжигаемые омические контакты были изготовлены на основе системы Ti/Al/Ni/Au. Были измерены вольт-амперные характеристики (темновые и при освещении УФ светодиодом с $\lambda = 365$ нм) изготовленных ФД до осаждения слоя диэлектрика и ВАХ финальных элементов. Было обнаружено, что применение пассивации привело к ожидаемому снижению темнового тока (I_d) ФД, минимальное полученное значение при смещении 0.1 В составило 0.9 мкА. Помимо этого, было отмечено резкое, не пропорциональное снижению I_d , увеличение отношения фототока к темновому I_{ph}/I_d практически на 2 порядка для всех типов изготовленных фоточувствительных элементов. Таким образом, выполнение пассивации позволило улучшить характеристики ФД на основе ультратонких слоев GaN.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (Договор 12ГУПКЭС18/91736 от 27.12.2023).

1. L. Goswami et al., *Appl. Surf. Sci.*, **449**, 186-192 (2018).

2. Сеницкая О. А. и др., *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, **15**, 157–162 (2022).

Т.М. Шугабаев (асп., 3 год, СПБАУ им. Ж.И. Алферова, лаб. эпитак. нанотех.),
В.О. Гридчин (м.н.с., СПБАУ им. Ж.И. Алферова, лаб. эпитак. нанотех.),
И.А. Мельниченко (асп., 3 год, НИУ ВШЭ СПб),
P. Bulkin (senior res. eng., Ecole Polytechnique, France),
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., зав. лаб. квант. оптоэлектрон., НИУ ВШЭ),
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб. эпитак. нанотех., СПБАУ им. Ж.И. Алферова)

ПЛАЗМОННЫЕ НАНОЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ InGaN

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) в силу своих естественных форм и размеров являются перспективными структурами для создания микро- и нанолазеров. Однако, размер полупроводниковых лазеров ограничен дифракционным пределом, что затрудняет их использование во многих оптоэлектронных приложениях. Одно из решений представляет собой интеграцию ННК с системой металл–диэлектрик, что позволяет создавать плазмонные нанолазеры, работающие в глубоко субволновом масштабе [1]. Среди них особое место занимают ННК на основе твердых растворов InGaN, способные излучать во всем видимом диапазоне [1].

Данная работа посвящена созданию лазеров с помощью одиночных ННК InGaN на плазмонных подложках и исследованию их оптических свойств. Два типа ННК длиной 1–2 мкм и диаметром 30–50 нм были синтезированы технологией молекулярно-пучковой эпитаксии на Si подложках. Первый тип представлял собой вертикальный массив ННК GaN с объемной вставкой InGaN, обладающей фотолюминесценцией (ФЛ) в диапазоне 500–600 нм. Второй тип являлся массивом ННК GaN с 15 парами квантовых ям/барьеров InGaN/GaN, демонстрирующих ФЛ в области 400–500 нм. Для создания нанолазеров исходные массивы ННК подвергались ультразвуковой обработке и отделялись от ростовой подложки. Затем одиночные ННК переносились на специально подготовленные плазмонные подложки, представляющие собой подложки Si, покрытые слоем Ag с шероховатостью менее 1 нм и слоем оксида алюминия толщиной 5 нм. Температурные и мощностные зависимости спектров микро-ФЛ одиночных ННК продемонстрировали лазерную генерацию в исследуемых структурах. Было показано, что в ННК первого типа режим лазерной генерации сохраняется при температурах ниже 40 К, тогда как ННК второго типа способны функционировать вплоть до 80 К. Более того, для ННК и первого, и второго типа наблюдалась относительно узкая ширина лазерной линии (0.1 нм) в сравнении существующими аналогами [1].

Полученные результаты могут представлять интерес для создания компонентов фотонных интегральных схем, сенсорики и других приложений, связанных с локализацией света в нанометровом масштабе.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (гос. зад. №0791-2023-0004).

1. Yu-Jung Lu, et al., Nano letters, **14**(8), 4381–4388 (2014).

ДЛИННОВОЛНОВЫЙ VCSEL НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ
ЯМАМИ HgTe/HgCdTe С СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОМ
И МЕТАЛЛОМ В КАЧЕСТВЕ ЗЕРКАЛ

Источники когерентного излучения в среднем инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне востребованы для применения в газовой спектроскопии и мониторинге окружающей среды. Для изготовления межзонных лазеров в среднем ИК диапазоне предлагается использование гетероструктур с КЯ на основе HgTe/HgCdTe, т.к. в таком случае возможно подавление оже-рекомбинации из-за гиперболического закона дисперсии. В данной работе будет рассмотрена схема вертикального резонатора с поверхностным излучением (VCSEL). Подобную схему с использованием диэлектрических брэгговских зеркал для лазеров на основе HgCdTe использовали ранее для ближнего [1] и среднего [2] ИК диапазонов. Их использование для лазеров дальнего ИК диапазона затруднительно, т.к. для обеспечения высокого коэффициента отражения требуется несколько десятков слоев толщиной порядка длины волны в среде. Для $\lambda \sim 20$ мкм оценка общей толщины структуры с двумя подобными зеркалами дает величину в несколько десятков мкм, что практически неосуществимо из-за сложности контроля технологических параметров на протяжении всего роста структуры. В работе представлены результаты исследований новой конструкции лазеров на основе HgCdTe, в которой в качестве зеркал используются тонкий металлический слой (Al) и слой сильнолегированного полупроводника (n^+ -GaAs) [3].

В экспериментах накачка активной среды (КЯ HgTe) осуществлялась CO₂-лазером с $\lambda = 10.6$ мкм через прозрачную для этого излучения подложку под углом $\approx 90^\circ$ к поверхности. Диаметр пучка лазерного излучения регулировался с помощью диафрагмы. Было проведено два эксперимента по получению стимулированного излучения (СИ) структуры, которые отличались геометрией сбора излучения: в первом случае излучение собиралось с поверхности образца под углом 90° , а во втором случае с торца образца. В диапазоне температур от 10 К до 70 К была получена СИ $\lambda \approx 16$ мкм. Установлено, что СИ наблюдается как с поверхности структуры, так и с торца. При этом сигнал с поверхности образца выше, а ширина спектра в 2 раза меньше, чем с торца. Проведенные электродинамические расчеты показывают, что изготовленная структура обеспечивает локализацию продольной моды, за счёт чего в структуре наблюдается не только основная лазерная мода, но и усиленное излучение с края структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-12-00310.

1. C. Roux et al.// Appl. Phys. Lett., 1999/ V. 75(12). P. 1661.
2. I. Vurgaftman et al.// J. Appl. Phys. 1998. V. 83(8). P. 4286.
3. А.А. Dubinov et al.// Optical Engineering. 2022. V. 61(9). P. 096108.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ (НМ)

УДК 535

К.А. Смирнов (студ., 2 курс маг., МГУ, Физический ф-т, каф. Квант. Эл.),
Е.И. Жабоев (студ., 2 курс маг., МГУ, Физический ф-т, каф. ОФиВП),
Н.В. Митетело (к.ф.-м.н., м.н.с., МГУ, Физический ф-т, каф. Квант. Эл.),
А.И. Майдыковский (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ, Физический ф-т, каф. Квант. Эл.),
Т.В. Мурзина (д.ф.-м.н., доц., МГУ, Физический ф-т, каф. Квант. Эл.)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОКРИСТАЛЛОВ ПЕРИЛЕНА

Микрокристаллы на основе органических материалов представляют большой интерес для современной фотоники, позволяя формировать миниатюрные оптические модули – резонаторы, волноводы, коннекторы, фильтры и проч., как активные, так и пассивные. Одним из перспективных материалов для формирования таких компонентов является перилен и производные на его основе – органические полупроводниковые материалы, используемые в настоящее время в оптоэлектронике и индустрии светоизлучающих материалов. Их отличает высокая механическая и термическая стабильность, а также высокий выход фотолюминесценции. Кристаллы перилена имеют моноклинную структуру (полиморфные фазы α или β) с фотолюминесценцией в желтой или зеленой области спектра, соответственно. Перспективной представляется реализация резонаторных структур на основе микрокристаллов перилена для задач сенсорики и развития микролазеров [1].

В данной работе методами линейной и нелинейной оптической микроскопии исследовались резонаторные свойства микрокристаллов перилена в форме прямоугольных параллелепипедов (α фаза), с характерными размерами сторон от 5 мкм до 13 мкм и высотой около 1 мкм, изготовленных методом самоорганизации на стеклянной подложке. В качестве источников зондирующего излучения использовались лазерный диод с длиной волны 405 нм или параметрический фемтосекундный генератор света с диапазоном перестройки по длинам волн от 670 нм до 2400 нм, излучение которых фокусировалось на поверхность кристаллов перилена в область с диаметром около 1 мкм. Регистрация спектра излучения возбуждаемой фотолюминесценции проводилась в конфокальной схеме на пропускание.

Показано, что одно- или двухфотонное фотовозбуждение микрокристаллов перилена приводит к возникновению спектра люминесценции с локализацией электромагнитного поля в определенных областях вблизи граней кристалла, что соответствует возбуждению в микроструктурах мод шепчущей галереи или мод Фабри–Перо. Экспериментально получен спектр линейной фотолюминесценции, в котором наблюдаются оптические собственные моды резонаторов, образованных микрокристаллами перилена. Показана генерация второй гармоники при двухфотонном фотовозбуждении микрокристаллов перилена. Выполнено моделирование резонаторных мод исследованных микрокристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 24-42-02009.

1. V.V. Pradeep, et al., *Adv. Optical Mater.*, **8**, 1901317 (2020).

Ж.А. Акрамов (асп., СПбПУ, ВИФШ),
М.А. Елистратова (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
И.Б. Захарова (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, ВИФШ),
С.А. Рыков (д.ф.-м.н., проф., СПбПУ, ВИФШ)

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСА ПОРФИРИНА С КОБАЛЬТОМ НА ПОДЛОЖКЕ ГРАФИТА

Порфирины представляют собой макроциклические органические соединения, обладающие высокой степенью термодинамической устойчивости. Эти молекулы могут координировать различные металлы, что значительно изменяет их физико-химические свойства и делает их перспективными для использования в различных областях, таких как электроника, фотокатализ и биомедицина. Применение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) может дать новую информацию о локальной структуре молекулярных кристаллов и их локальных электронных свойствах

Объектом исследования служила тонкая пленка мезотетрафенилпорфирина кобальта (СоТТР), нанесенная на подложку из монокристалла пиролитического графита методом конденсации из насыщенного раствора в толуоле (методом полива). Использовался СТМ с электромагнитной системой грубого подвода образца к игле, изготовленной электрохимическим травлением проволоки вольфрама диаметром 300 мкм. Были изучены особенности топографии поверхности образца и вольтамперные характеристики (ВАХ) – локальные туннельные спектры (ЛТС). Все измерения выполнены на воздухе при комнатной температуре.

СТМ изображения поверхности, полученные при различном пространственном разрешении, демонстрируют протяженные ступеньки скола кристалла графита, ориентированные в разных направлениях. Другим типом особенности являются узкие параллельные полосы, ориентированные в направлении сканирования иглы вдоль поверхности образца. По-видимому, эти участки поверхности покрыты тонким слоем плохо проводящего материала, которого игла при сканировании практически касается. Мы предполагаем, что это тонкий слой металлокомпозита СоТТР, обедненный свободными носителями заряда.

Были получены ЛТС нескольких типов – как ВАХ, имеющие гистерезис при изменении направления развертки напряжения смещения, так и практически без гистерезиса, но сильно асимметричные относительно нулевого напряжения смещения, а также линейные ВАХ. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования СТМ для изучения металлокомплексов порфирина.

А.О. Баженов (асп., 1 год., НГУ, каф. физики полупроводников),
Н.П. Степина (д.ф.-м.н., в.н.с., ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН)

ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТРЕХМЕРНОГО ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА $(\text{Bi}, \text{Sb})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$

Проявление уникальных свойств трехмерных топологических изоляторов (ТИ) привлекает большое внимание научного сообщества в силу перспективности их использования в качестве основы для спин-зависимых устройств. Сочетание симметрии обращения времени и сильного спин-орбитального взаимодействия в данных материалах приводит к образованию поверхностных состояний на границе топологического и тривиального изолятора, которые описываются нечетным числом конусов Дирака с направлением спина, ортогональным волновому вектору и однозначно с ним связанным. Данные состояния устойчивы к обратному рассеянию на немагнитных примесях и дефектах. Однако, несмотря на активное исследование пленок ТИ, выявление вклада поверхностных состояний в магнето-транспортные свойства остается непростой задачей из-за шунтирования поверхностных состояний проводимостью объема.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование магнето-транспортных свойств пленок трехмерного топологического изолятора на основе халькогенидов висмута и сурьмы $(\text{Bi}, \text{Sb})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111). Измерения осуществлялись при различных температурах и затворных напряжениях. Для всех значений напряжений на затворе обнаружено положительное магнетосопротивление (МС), которое не насыщается до полей 4 Т. В области слабых магнитных полей магнетосопротивление описывается квантовыми поправками к проводимости, величина которых зависит от затворного напряжения и увеличивается при приближении к точке зарядовой нейтральности. Высокополевая часть МС слабо чувствительна к направлению магнитного поля и может быть описана с учетом электрон-электронного взаимодействия, которое изменяется в магнитном поле за счет эффекта Зеемана из-за достаточно больших значений g-фактора для таких пленок.

Детальный анализ эффекта Холла показал, что коэффициент Холла R_H немонотонен и сильно изменяется в слабых полях при всех напряжениях на затворе. Наиболее сильная нелинейность R_H , наблюдается при больших отрицательных затворных напряжениях. Установлено, что в области малых магнитных полей коэффициент Холла при высоких отрицательных напряжениях слабо зависит от температуры. В больших полях наклон зависимости коэффициента Холла от магнитного поля меняет свой знак в зависимости от затворного напряжения. Такое поведение R_H объясняется формированием двумерного дырочного газа в системе при значительных отрицательных затворных напряжениях.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда и правительства Новосибирской области № 24-22-20066.

Н.В. Валенко (асп., 2 год, МГУ, каф. ОФиФКС),
 О.А. Дмитриева (асп., 3 год, МГУ, каф. ОФиФКС, ИОФ им. А.М. Прохорова РАН),
 С.Г. Тиходеев (д.ф.-м.н., чл. кор. РАН, проф., МГУ, каф. ОФиФКС, ИОФ им. А.М. Прохорова
 РАН)

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХИРАЛЬНОЙ МЕТА МЕМБРАНЫ

В последнее десятилетие внимание многих исследователей привлекают метаповерхности, обладающие максимальной хиральностью [1–3], пропускающие одну циркулярную поляризацию и отражающие другую, конвертеры и фильтры циркулярной поляризации. Такие конвертеры для длин волн разных диапазонов (оптического, инфракрасного, терагерцового) могли бы быть полезными в спектроскопии, биосенсорике, сотовой связи, квантовой оптике. В докладе будет рассмотрен пример метаповерхности, подобной предложенной в работе [1], оптимизированной для диапазона длин волн 10–12 мкм.

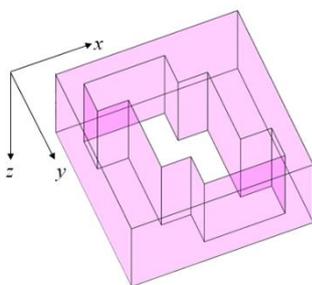


Рис.1. Схематическое изображение элементарной ячейки хиральной метаповерхности.

Предполагается, что метаповерхность изготовлена из слоя алмаза с показателем преломления 2.4 и толщиной 4 мкм. В данном слое просверлены хиральные отверстия с осью вращения C_2 (см. на рис.1). Период квадратной решетки 7 мкм, элементарная ячейка состоит из слившихся в одно целое центрального квадратного отверстия со стороной 3 мкм и двух смещенных прямоугольных отверстий со сторонами 3,1 и 1,2 мкм, центры которых имеют координаты $(-1.2, +2.1)$ и $(+1.2, -2.1)$ мкм. Структура была оптимизирована для длины волны света $\lambda = 11$ мкм.

В докладе будут рассмотрены спектры пропускания, отражения и поглощения для обсуждаемой структуры, рассчитанные Фурье-модальным методом, а также критическое влияние на эти спектры и на свойство максимальной хиральности оптических потерь.

1. Semnani B., et al., Spin-preserving chiral photonic crystal mirror, *Light-Sci. Appl.*, **9**(23), 1–12 (2020).
2. Gorkunov M.V., et al., Metasurfaces with Maximum Chirality Empowered by Bound States in the Continuum, *Phys. Rev. Lett.*, **125**, 093903 (2020).
3. Voronin K., et al., Single-Handedness Chiral Optical Cavities, *ACS Photonics*, **9**, 2652–2659 (2022).

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

	<i>Секция</i>	<i>Стр.</i>			
Авдеев П.Ю.	У-9	78	Иванов А.А.	ГСКЯ-6	43
Аветисян А.Г.	У-44	54	Каланатевский И.Э.	У-37	44
Адлер А.Ю.	У-12	55	Канафиева Е.Ф.	У-26	23
Акрамов Ж.А.	НМ-1	98	Караулов Д.А.	ГСКЯ-2	36
Аникина М.А.	У-47	79	Кириленко Я.Д.	ПОиН-3	73
Артеев Д.С.	У-30	39	Клюев К.М.	У-31	11
Ахундов А.Я.	У-19	7	Ковач Я.Н.	У-11	83
Баженов А.О.	У-22	99	Козко И.А.	У-50	59
Бахметьев М.В.	У-32	40	Колобкова Е.М.	У-5	45
Белоконь И.С.	ПР-1	21	Коляда Д.В.	ПОиН-16	85
Бердников В.С.	У-20	15	Корниенко П.Д.	ПР-2,	24,
Бетке И.А.	ГСКЯ-1	33		ПР-3	25
Бурдуленко О.В.	КТКН-4	56	Кравченко А.С.	У-25	26
Бурмистров Е.Р.	У-28	41	Кузнецов А.	ПОиН-4	84
Валенко Н.В.	У-24	100	Кузнецов Ю.М.	КТКН-1	68
Ващенко М.В.	ОСП-1	8	Ладанова Ю.А.	ПР-4	27
Ведь М.В.	ПОиН-1	80	Луцевич Д.А.	У-48	60
Веретенников А.И.	У-36	57	Мажукина К.А.	У-41	86
Войтович В.И.	У-10	71	Майдэбура Я.Е.	ПР-5	31
Гайворонская А.А.	ПР-9	22	Малевская А.Д.	ПОиН-5	74
Горкин Д.Н.	У-46	58	Машинский К.В.	ПОиН-6	87
Григоренко И.Н.	У-7	81	Михайленко Н.О.	У-34	66
Гришунов В.В.	У-42	70	Моисеенко И.М.	ГСКЯ-3	46
Доморацкий Е.В.	У-2	34	Назаров Р.С.	У-18	16
Дурнев М.В.	ПД-1	5	Ненашев Г.В.	ПОиН-7	88
Емельянов И.Д.	ОСП-2	9	Образцова А.А.	У-8	75
Живописцев А.А.	У-14	67	Панфилов А.С.	ГСКЯ-4	47
Захаров В.Е.	У-49	82	Папылев Д.С.	ПОиН-8,	89,
Захарченко М.В.	У-39	42		ПОиН-9	90
Здоровейщев Д.А.	ОСП-3	10	Петров А.С.	У-3	48
Зедоми Т.Э.	У-4	35	Поленок Е.Д.	У-6	37
Зырянова О.Д.	ПОиН-2	72	Пуговкин А.А.	ПОиН-10	76

Ремеле В.Е.	ПР-6	28	Фоминых Б.М.	ОСП-5	17
Ружевич М.С.	ПР-7	32	Фунтикова А.С.	КТКН-3	65
Русских К.И.	У-38	62	Харченко А.А.	У-1	52
Савин А.В.	ГСКЯ-5	49	Хахулин С.А.	У-35	53
Самарцев И.В.	ПОиН-11	91	Цырлин Г.Э.	ПД-2	6
Самигуллина А.И.	ПР-10	29	Чуманов И.В.	ОСП-6	18
Самсонов М.А.	ОСП-4	12	Чэн Ю.	ПОиН-14	93
Сапожникова Е.В.	ПОиН-12	92	Шаров В.А.	У-16	69
Свинкин Н.А.	ПОиН-13	77	Шевченко И.В.	ОСП-7	19
Сличенко Д.В.	КТКН-2	61	Шенцев А.М.	У-29	38
Слободнюк А.С.	У-17	13	Шубина К.Ю.	ПОиН-15	94
Смирнов И.А.	У-40	63	Шугабаев Т.М.	У-45	95
Смирнов К.А.	У-23	97	Яковлева А.А.	У-27	20
Смирнова В.А.	У-33	50	Якушова Н.Д.	ПР-8	30
Снегирев А.В.	У-13	51	Янцер А.А.	У-43	96
Телицын Н.С.	У-21	14			
Теслина П.П.	У-15	64			

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Тезисы докладов
Всероссийской научной молодежной конференции
25–29 ноября 2024 года
Санкт-Петербург

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

Подписано в печать 13.11.2024. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 6,5. Тираж 148. Заказ 4227.

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.