



## Сборник тезисов

23-26 июня 2025 г.

Инновационный кластер «Технополис GS»  
г. Гусев, Калининградская область

## СОДЕРЖАНИЕ

СПЕКТРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НЕНАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs, Е.А. Башегурова.....	8
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОС- ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ, Д.А. Белов, А.В. Иконников, Д.Р. Хохлов, Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, И.Е. Мартычев, Т.А. Багаев, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, А.Ю. Павлов, Р.Р. Галиев, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин.....	11
ХИРАЛЬНЫЕ АМФИФИЛЬНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ТОЧКИ, А.А. Ведерникова, Хуан Хе, Е.В. Ушакова.....	13
ПАССИВНЫЕ СМЕСИТЕЛИ НА ОСНОВЕ 0,5 МКМ GaAs-РНЕМТ- ТЕХНОЛОГИИ С-, Х-ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ С МАКСИМАЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕДАЧИ И МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ, О.А. Головань .....	15
ПЛЕНОЧНЫЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, А.О. Ситникова, Р.М. Голубев .....	17
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В ДВУМЕРНЫХ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ ПЕРМАЛЛОЯ, К.А. Гриценко, В.К. Беляев, З.А. Григорьева, Т.А. Митрофанов, Д.В. Мурзин, В.В. Родионова .....	19
ОБЛАСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В Р-Н ПЕРЕХОДЕ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ, В.И. Гусев .....	21
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ МЕМРИСТИВНОГО НАНОСЛОЯ $TiO_x$ НА КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКЕ Au, Т.З. Гусейнов, О.Р. Бакиева .....	22
СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕТЕРОГРАНИЦЫ $\kappa$ - $Ga_2O_3$ /GaN А.Ю. Иванов, Ш.Ш. Шарофидинов, М.В. Дорогов, А.М. Смирнов <sup>1</sup> , А.Е. Романов .....	24
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДА НА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕЕК ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ С.В. Ильев, И.А. Мутаев, М.В. Спиридовон, А.А. Чуприк .....	25
НРНТ АЛМАЗ С NV-ЦЕНТРАМИ ДЛЯ КВАНТОВОЙ СЕНСОРИКИ И.В. Клепиков, А.В. Колядин, Р.В. Исаков, О.С. Боков, В.Г. Винс, Е.А. Васильев .....	27
ЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНОСИЛОКСАНОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ, Е.И. Климова, О.О. Молоканова, Г.О. Молоканов .....	28
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ МИ-РЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ, А. Кузнецов, А.А. Кутузова,	

В.М. Кондратьев, В.В. Федоров, А.Д. Большаков .....	31	
ВКЛАД ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕХАНИЗМ РЕЗИСТИВНОГО		
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТИТАНАТА БАРИЯ,		
М.В. Левичев, О.Ю. Вилко, Н.В. Андреева.....	34	
ИЗБИРАТЕЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ		
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВАНАДАТОВ		
ИНДИЯ И ВИСМУТА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ И ИНЕРТНОЙ		
АТМОСФЕРЕ, Я.М. Можаров, А.В. Марикуца .....	35	
ТРАНСЭНЕРГОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ		
ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ, О.А. Молоканова (Москалюк),		
Е.С. Цобкалло, Г.П. Мещерякова, Г.О. Молоканов .....	38	
ГИБРИДНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО		
WSe <sub>2</sub> И УПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛАЗМОННЫХ ЗОЛОТЫХ НАНОБАМПОВ,		
А.В. Николаева, М.А. Аникина, А.А. Кучмижак, В.М. Кондратьев, В.А. Шаров,	40	
Е.Ю. Барулина, А.Д. Большаков .....		
АНАЛИЗ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ		
ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ, А.А. Образцова, И.С.		
Махов, И.А. Мельниченко, К.А. Иванов, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков .....	42	
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РОСТА СИЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ		
ЯМ In(x>0.35)GaAs НА ВРЕМЯ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ		
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, Д.С. Папылев, А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев,		
Л.Я. Каракинский, В.В. Андрюшкин, И.И. Новиков, А.О. Ефимов, А.Ю.		
Егоров, А.М. Надточий.....	45	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ		
СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ,		
М.И. Пауков, С. Коларь, К. А. Брёхов, Д. В. Красников, Г. А. Командин, А. И. Чернов,		
К. И. Зайцев, А. Г. Насибулин, М. Г. Бурданова .....	47	
ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОРЕЗИСТОРОВ		
ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, А.А. Пятлин, Д.В. Морозов.....		48
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ФРЕНЕЛЕВСКАЯ ЗОННАЯ		
ПЛАСТИНКА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ		
АДАПТИВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СИСТЕМ, А.В. Радивон, Н.И. Рагинов,		
Г.М. Катыба, А.А. Мкртчян, А.В. Черных, И.И. Раков, М.И. Пауков, М.С.		
Миронов, М.А. Шашков, Г.А. Командин, К.И. Зайцев, Ю.Г. Гладуш, Н.В.		
Петров, А.Г. Насибулин, А.В. Арсенин, Д.В. Красников <sup>4</sup> , М.Г. Бурданова.....	51	
КОНСТРУКЦИИ СЕКТОРНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ		
НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs/GaAs, Романчук А.К., Малевская А.В.,		
Калюжный, Н.А., Покровский П.В., Нахимович М.В., Шварц М.З. ....	52	
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НОВЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ		
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ, ДЛЯ ИНТЕРФЕЙСНЫХ СЛОЕВ		
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, Сухорукова П.К., Балакирев Д.О.,		

Гостищев П.А., Е.А. Ильичева, Саранин Д.С., Лупоносов Ю.Н .....	54
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХИРАЛЬНЫХ КВАЗИ-2Д ПЕРОВСКИТОВ, Ю.А. Тимкина, И.А. Алейник, Е.В. Ушакова .....	55
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СКРИНИНГА 3D-СФЕРОИДОВ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК, М.А. Трофимов, В.С. Лавриненко, В.Е. Попов, С.Ф. Тяжельников, А.С. Букатин .....	57
ТЕРАГЕРЦОВАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs, Н.Ю. Харин, М.Я. Винниченко, В.Ю. Паневин, Д.А. Фирсов .....	59
ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ С ЭЛЕКТРОННЫМ СЧИТЫВАНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКОГО КАРКАСА HKUST-1, В.В. Харитонова, А.В. Любимова, В.А. Миличко, С.В. Бачинин.....	61
СТРУКТУРНО-ЗАВИСИМЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ, Д.А. Жукалин, И.И. Долгих, Я.С. Часовских .....	63
МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ФОТОЛИТОГРАФИИ С УЧЁТОМ НЕРОВНОСТИ КРАЯ ЛИНИИ КАК СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ, А.А. Шарапов, Е.С. Горнев.....	66
ДЕТЕКТОРЫ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАТОНКИХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaN, К.Ю. Шубина, О.А. Синицкая, Я.Б. Эннс, А.В. Уваров, А.М. Мизеров, Е.В. Никитина.....	68

**GS Group** – российский инвестиционно-промышленный холдинг со штаб-квартирой в Санкт-Петербурге. Ключевой компетенцией холдинга является разработка и производство микро- и радиоэлектроники.

Флагманский инвестиционный проект холдинга — инновационный кластер «Технополис GS» в городе Гусев, Калининградской области. С 2008 года на территории кластера реализуется полный цикл производства электронных устройств (от корпусирования микросхем до упаковки готовой продукции) и предлагается широкий спектр направлений контрактного производства, мощности которого позволяют выпускать до 20 млн микросхем и до 20 млн радиоэлектронных изделий различного назначения в год.

Площадь развивающейся территории – 230 га. Инвестиции в проект составили более 10 млрд рублей.

В работе на предприятиях инновационного кластера «Технополис GS» задействованы более 1000 сотрудников.

Для сотрудников холдингом построен и запущен в эксплуатацию отдельный коттеджный поселок европейского типа, резиденты которого живут в комфортабельных современных домиках с развитой социально-бытовой инфраструктурой: детскими площадками, теннисным кортом, зонами для спорта и отдыха, велодорожками. При создании всего кластера и жилого квартала в частности использовались лучшие практики развития территорий, разработанные совместно с ведущими центрами урбанистики.



# **Алферовская школа молодых ученых по микроэлектронике**

## **Программный комитет:**

- Мухин Иван Сергеевич, проректор по науке Алфёровского университета – председатель оргкомитета.
- Пластинин Сергей Владимирович, генеральный директор GS Nanotech.
- Цырлин Георгий Эрнстович, заведующий лабораторией эпитаксиальных нанотехнологий Алфёровского университета.
- Белова Полина Юрьевна, директор службы медиа и коммуникаций холдинга GS Group.
- Суханова Ольга Витальевна, руководитель отдела брендинга и организации мероприятий холдинга GS Group.
- Митин Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник Алфёровского университета.

# СПЕКТРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НЕНАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs

Е.А. Башегурова \*

Санкт-Петербургский государственный университет,

Санкт-Петербург, Россия

\*e.bashegurova@spbu.ru

Гетероструктуры с квантовыми точками (КТ) имеют практическое приложение в области лазерных технологий и квантовой криптографии: на их основе изготавливаются лазеры [1] и однофотонные источники [2]. Традиционно КТ выращиваются на основе InGaAs/GaAs методом Странски-Крастанова, что приводит к возникновению в образце с КТ механического напряжения, что приводит к декогеренции спинов электронов. Во избежание данного эффекта, были созданы КТ GaAs/AlGaAs эпитаксиального заполнения наноотверстий, проправленных под каплями галлия. Целью работы являлось изучение свойств образца методами оптической спектроскопии, а также получение информации о том, насколько выращиваемые КТ одинаковы между собой.

В данной работе исследовался образец с пространственно разрешенными GaAs/AlGaAs КТ, плотность распределения КТ в котором – порядка 1 точки на  $2 \text{ мкм}^2$ . Такая плотность КТ в образце была достигнута уменьшением скорости потока галлия в 10 раз при его нанесении на подложку GaAs по сравнению с прошлым образцом исследований [3].

Для образца были получены низкотемпературные спектры фотолюминесценции (ФЛ), при использовании непрерывного лазера накачки длиной волны 532 нм. На Рис. 1 приведен спектр ФЛ одиночной КТ.

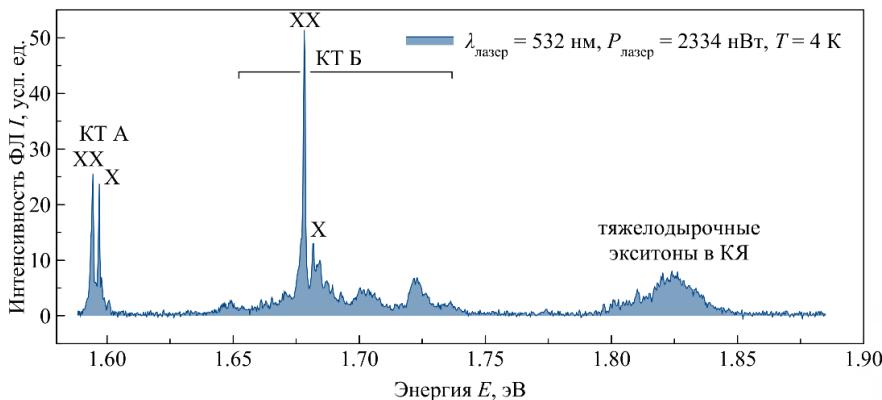


Рис. 1. Спектр ФЛ одиночной КТ,  $T = 3,5 \text{ К}$ , мощность лазера  $2,334 \text{ мкВт}$ .

В спектре на Рис. 6 можно выделить следующие линии излучения ФЛ (от меньшей энергии к большей): биекситон (XX) в КТ А ( $E = 1,594 \text{ эВ}$ ), экситон

(Х) в КТ А ( $E = 1,597$  эВ), XX в КТ Б ( $E = 1,678$  эВ), X в КТ Б ( $E = 1,682$  эВ), тяжелодырочные X в квантовой яме (КЯ) ( $E = 1,824$  эВ).

При сканировании поверхности образца пятном лазера диаметром 1 мкм вдоль кристаллографической оси x были получены карты ФЛ для двух режимов по мощности лазера накачки – режим X и XX, и возбужденное состояние, связанное с зарядкой образца (Рис 2 (а, б)). При попадании пятна лазера на нанохолмик (Рис. 2 (в)), под которым находится КТ, в спектре ФЛ проявляются пики X и XX для КТ А и Б (Рис. 2 (а)), или полосы ФЛ для возбужденных состояний (Рис. 2 (б)). По полученным спектрам ФЛ были определены энергии X, XX и энергия связи XX, их значения для КТ А и Б приведены в виде графика (Рис. 3 (а)). По этому графику можно сделать вывод о том, что КТ А, по сравнению с КТ Б, мало отличаются друг от друга. Так же, здесь видно, что с увеличением энергии X, т.е. уменьшением размера объекта размерного квантования, растет энергия связи XX.

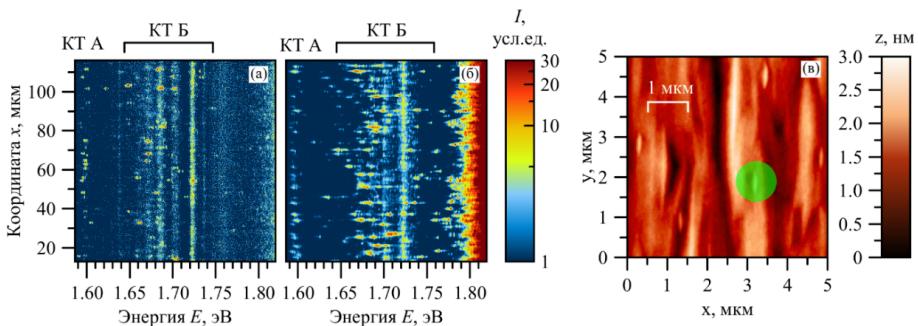


Рис. 2. (а) Карта ФЛ  $I(E, x)$  для сканирования вдоль оси  $x$  ( $T = 3,5$  К,  $P = 1,5$  мкВт). (б) Карта ФЛ  $I(E, x)$  для сканирования вдоль оси  $x$  ( $T = 3,5$  К,  $P = 7$  мкВт). Карты ФЛ относятся к разным участкам образца. (в) Снимок поверхности образца в ACM.

Для КТ А была исследована зависимость ФЛ от мощности лазера накачки (Рис. 3 (б)). Было определено, что площадь под пиком, называемым XX, увеличивается быстрее площади под пиком X с увеличением мощности лазера накачки, что указывает на то, что наблюдаемые пики относятся к X и XX. Так же это подтверждается проведенными температурными исследованиями: с увеличением температуры образца пик XX пропадает раньше пика X.

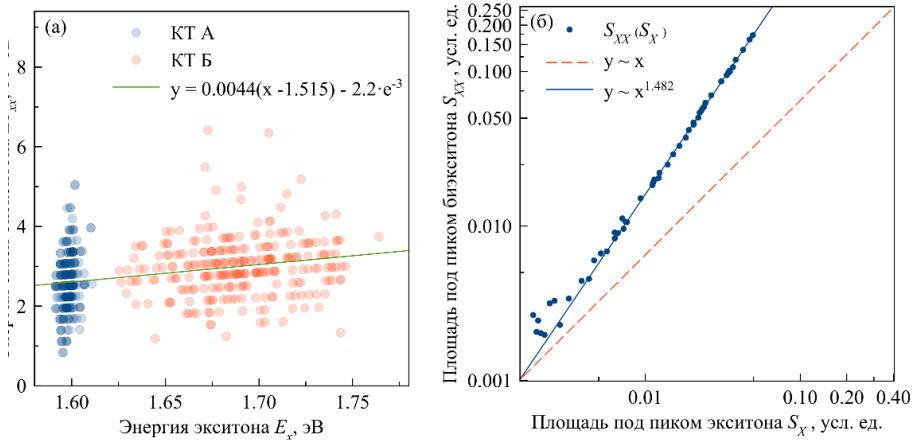


Рис. 3. (а) Энергия связи  $XX Eb_{xx}$  в зависимости от энергии  $X E_x$  для КТ А (синим) и Б (красным).  
(б) Зависимость площади под пиком  $XX S_{xx}$  в спектре ФЛ от площади под пиком  $X S_x$  в спектре ФЛ, оси в логарифмическом масштабе.

Итак, в ходе проведения исследования были изучены одиночные GaAs/AlGaAs КТ, плотность распределения их в образце позволяет исследовать каждую КТ отдельно от других. В полученных низкотемпературных спектрах ФЛ были выделены пики X и XX, основываясь на исследованиях зависимости ФЛ от мощности лазера накачки и температуры образца. При сканировании поверхности образца были получены спектры ФЛ множества точек, по которым были сделаны следующие выводы: КТ А имеют меньшие различия между собой по сравнению КТ Б, а их меньшая энергия ФЛ говорит о большем размере. Таким образом, КТ А – эпитаксиально заполняемые наноотверстия, а КТ Б – меньшие квантоворазмерные объекты вблизи наноотверстий, свойства которых не зависят от КТ А.

#### Библиографический список

1. *Shang, C., Feng, K., Hughes, E.T. et al. // Light. Sci. Appl. 2022. 11, 299.*
2. *Somaschi, N. et al. // Nat. Photon. 2016. 10, 340.*
3. *E. Deribina, A. Murzin, E. Bashegurova // Phys. Rev. B. 2023, 108, 205305.*

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОС- ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ

Д.А. Белов<sup>1\*</sup>, А.В. Иконников<sup>1</sup>, Д.Р. Хохлов<sup>1</sup>, Д.В. Ушаков<sup>2</sup>, А.А. Афоненко<sup>2</sup>, И.Е. Мартычев<sup>3</sup>, Т.А. Багаев<sup>3</sup>, А.А. Мармалюк<sup>3</sup>, М.А. Ладугин<sup>3</sup>, А.Ю. Павлов<sup>4</sup>, Р.Р. Галиев<sup>4</sup>, Д.С. Пономарев<sup>4</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, д. 4, Минск,  
Минская область, Беларусь

<sup>3</sup>НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, ул. Введенского, д. 3, корп. 1, Москва, 117342

<sup>4</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,  
Нагорный пр-д, д. 7, Москва, 117105

\*belov.da17@physics.msu.ru

Терагерцовые квантово-каскадные лазеры (ТГц ККЛ) считаются одними из наиболее перспективных излучателей терагерцового диапазона. В силу высокой чувствительности характеристик этого типа лазеров к качеству роста гетероструктуры активной области, общепринятым методом изготовления ТГц ККЛ является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Существует всего несколько работ, в которых применялся альтернативный метод — МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ) [2, 3]. В указанных работах была продемонстрирована работа ТГц ККЛ в импульсном режиме. Считается, что МОСГЭ не может конкурировать с МЛЭ в отношении резкости гетерограниц и чистоты материала. Однако при работе в режиме низкого давления в реакторе с малыми скоростями роста удается обеспечивать достаточную резкость гетерограниц. Кроме того, метод МОСГЭ обладает такими преимуществами, как возможность масштабирования реактора для одновременного роста множества структур и меньшая требовательность к поддержанию параметров роста.

В данной работе изучались характеристики ТГц ККЛ, выращенных методом МОСГЭ и работающих в *непрерывном* режиме. Исследованные лазеры на основе активной области из  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  с четырёхъярусным дизайном с Au — Au волноводом выполнены в виде полосков шириной 20 и 40 мкм и длиной 1 мм. Рост многоярусной гетероструктуры активной области методом МОС-гидридной эпитаксии осуществлялся в НИИ «Полюс» [2]. Наряду со спектрами излучения ТГц ККЛ, измеренными как в непрерывном, так и в импульсном режиме, в работе представлены их излучательные и вольт-амперные характеристики.

При работе в непрерывном режиме ККЛ демонстрируют генерацию на

продольных модах Фабри — Перо с межмодовым расстоянием около 42 ГГц и центральной частотой около 4,5 ТГц. При увеличении рабочего напряжения наблюдается «перекачка» интенсивности излучения в более высокочастотные моды. В случае «узкого» ККЛ при значениях напряжения около 10,5 В (в окрестности центральной частоты) генерация становится одномодовой.

Спектры, измеренные в импульсном режиме, отличаются от непрерывных. В спектре «узкого» лазера остаются лишь высокочастотные моды в окрестности 4,6 ТГц, в то время как спектр «широкого» ККЛ значительно расширяется в область низких частот и охватывает широкий диапазон от 3,9 до 4,6 ТГц. Максимальная рабочая температура в импульсном режиме — около 60 К. Также наблюдается собственная непрерывная перестройка линий генерации за счет эффекта затягивания мод в диапазоне около 6 ГГц.

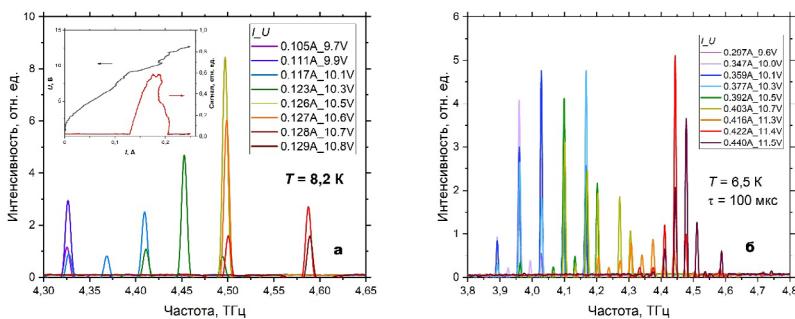


Рис. 1. (а) Спектральные характеристики непрерывного ТГц ККЛ, выращенного методом МОС-гидридной эпитаксии, при температуре 8,2 К со сканированием по рабочему напряжению. На вставке: вольт-амперная и излучательная характеристики ККЛ при температуре 4,2 К, измеренные в импульсном режиме с длительностью импульса 10 мкс и частотой повторения 100 Гц. (б) Спектры излучения «широкого» ТГц ККЛ в импульсном режиме с длительностью импульса 100 мкс и частотой повторения 100 Гц при температуре 6,5 К со сканированием по рабочему напряжению.

Таким образом, впервые была продемонстрирована работа ТГц ККЛ, выращенных методом МОСГЭ, в непрерывном режиме.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-19-00436. Д.А. Белов благодарит за поддержку фонд «БАЗИС» (грант № 23-2-10-29-1).

#### Библиографический список

1. *Vitiello M. S. et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges //Optics express. 2015. T. 23. №. 4. C. 5167-5182.*
2. *Багаев Т. А. и др. Квантово-каскадный лазер с частотой генерации 3.8 THz, выращенный методом металлоорганической газофазной эпитаксии //Письма в Журнал технической физики. 2022. T. 48. №. 10. C. 16-19.*
3. *Sirigu L. et al. A terahertz quantum cascade laser grown by low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy //Applied Physics Letters. 2008. T. 92. №. 18.*

# ХИРАЛЬНЫЕ АМФИФИЛЬНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ТОЧКИ

А.А. Ведерникова<sup>1\*</sup>, Хуан Хе<sup>2</sup>, Е.В. Ушакова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Университет Сучжоу, Сучжоу, Китай

<sup>3</sup> Городской Университет Гонконга, Гонконг, Китай

\*aavedernikova@itmo.ru

Хироптические материалы особым образом взаимодействуют с поляризованным светом, что открывает новые перспективы для таких передовых областей, как квантовые коммуникации, оптоэлектронные устройства (например, 3D-дисплеи и детекторы) [1] и биомедицина [2]. Среди множества хиральных материалов особый интерес представляют углеродные точки (УТ) благодаря своим преимуществам: низкой стоимости изготовления, высокой стабильности, настраиваемым оптическим свойствам, оптоэлектронной эффективности и уникальной химической структуре. В частности, хиральные УТ — перспективный материал для создания детекторов циркулярно-поляризованного света, поскольку обладают высокими коэффициентами поглощения в широком оптическом диапазоне [3,4]. Однако для применений критически важна растворимость материала в неполярных средах, что ограничивает использование традиционных УТ, так как их поверхностные функциональные группы обеспечивают растворимость лишь в полярных растворителях. В данной работе были получены и исследованы УТ, которые обладают хиральным сигналом в оптическом диапазоне 250–450 нм. Полученный материал обладает амфи菲尔ными свойствами и хорошо растворяется в неполярных растворителях, что делает их перспективным для создания оптоэлектронных устройств.

Хиральные амфи菲尔ные УТ были получены одностадийным методом синтеза без растворителя путем нагрева прекурсоров — хиральной молекулы R-/S- $\alpha$ -метилбензиламина и солей формамидиния (йодида, бромида и ацетата). Хиральные образцы далее в тексте и на рисунке обозначены как ACD-B, где первая буква (A) обозначает тип энантиомера, а последняя (B) — тип соли формамидиния. Так, из анализа изображений, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии, полученные УТ имеют сферическую форму и средний размер 10,1  $\pm$  8,7 нм, 8,4  $\pm$  5,4 нм и 5,4  $\pm$  4,9 нм для rCD-Br, rCD-I и rCD-OAc соответственно. Поверхность таких УТ богата азотом, что делает их растворимыми как в полярных, так и в неполярных растворителях. Кроме того такие образцы обладают фотолюминесценцией (ФЛ) в широком оптическом диапазоне от 300 до 650 нм с относительным квантовым выходом ФЛ для длины волны возбуждения 350 нм равным 17%, 18% и 40% для rCD-Br, rCD-I и rCD-OAc, соответственно.

На рисунке 1 приведены спектры кругового дихроизма в растворителях с различной полярностью: изопропиловый спирт (0,654), диметилсульфат (ДМСО) (0,444), толуол (0,099), нормализованные значения полярности ( $E_T^N$ )

указаны в скобках. Так, у полученных УТ наблюдается четыре перехода в районе 230–400 нм. У образцов rCD-Br и rCD-I есть пик (I) на ~ 240 нм, тогда как у образца rCD-OAc он смещается в сторону больших энергий. У всех образцов наблюдается пик (II) ~ 260 нм, который можно отнести к сигналу от хиральной молекулы  $\alpha$ -метилбензиламина. Также все образцы обладают широким переходом (III) в области 275–360 нм с двумя пиками на 285 и 315 нм. В зависимости от выбранной соли в качестве прекурсора интенсивность этих пиков перераспределяется: у rCD-Br и rCD-OAc более интенсивный коротковолновый пик, а у rCD-I – длинноволновый пик. Также для всех образцов наблюдается наименее выраженный пик (IV) в области 350–400 нм оптического спектра. При диспергировании в ДМСО и толуоле оптические переходы сохраняются со сдвигами, не превышающими 30 нм.

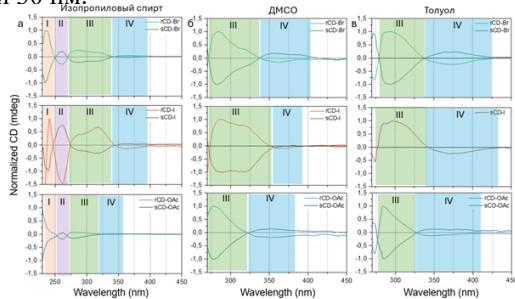


Рисунок 1 – Спектры кругового дихроизма для УТ из разных солей формамидиния в (а) изопропи-лом спирте, (б) ДМСО и (в) толуоле

Полученный наноматериал обладает широкополосной ФЛ (300–650 нм) и хироптическим откликом (250–450 нм). Кроме того, такие УТ проявляют амфифильные свойства, обеспечивая их диспергируемость как в полярных, так и в неполярных растворителях при сохранении оптической стабильности (спектральный сдвиг менее 30 нм). Эти характеристики делают данный материал перспективным кандидатом для применения в оптоэлектронных устройствах. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-13-00294).

#### Библиографический список

1. Hao C. et al. Circularly polarized light-enabled chiral nanomaterials: from fabrication to application // Nano-Micro Letters. – 2023. – Т. 15. – №. 1. – С. 39.
2. Fan Y. et al. Biological applications of chiral inorganic nanomaterials //Chirality. – 2022. – Т. 34. – №. 5. – С. 760-781.
3. Zhang Y. et al. Adjusting TADF and Phosphorescence for Tailored Dynamic Time-Dependent Afterglow Colored Carbon Dots spanning Full Visible Region //Angewandte Chemie International Edition. – 2025. – Т. 64. – №. 11. – С. e202421421.
4. Gao X. et al. Spatial Isolation Induced Solid-State Emissive Chiral Carbon Dots for Achieving Efficient Circularly Polarized Light Emission and Detection //Advanced Functional Materials. – 2025. – С. 2508648.

# ПАССИВНЫЕ СМЕСИТЕЛИ НА ОСНОВЕ 0,5 МКМ GaAs-РНЕМТ-ТЕХНОЛОГИИ С, Х-ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ С МАКСИМАЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕДАЧИ И МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

**О.А. Головань**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),*

*Санкт-Петербург, Россия;*

*golovan\_oa@spbstu.ru*

Одним из перспективных направлений развития области электроники является СВЧ-электроника, в основе действия которой лежит применение смесителей. Приемопередающая аппаратура СВЧ диапазона, в частности С- и Х-диапазонов частот, широко используется в системах радиолокации, системах спутниковой связи, наземных беспроводных системах связи. Для обеспечения преимуществ СВЧ систем требуются смесители, осуществляющие качественную работу с высокочастотными сигналами. Для этого необходима разработка методик оптимального параметрического синтеза, позволяющих проектировать интегральные схемы смесителей с улучшенными характеристиками: максимальным коэффициентом передачи и минимальным уровнем нелинейных искажений.

К существующим методам анализа смесителей относятся метод анализа на основе матрицы преобразований, метод анализа на основе операторного метода решения систем уравнений нелинейно-параметрических цепей, метод анализа с использованием рядов Вольтерра, рассматриваемых в качестве тензорных функций [1-3]. Главным недостатком этих методов анализа является то, что они не удовлетворяют требованиям комплексного символьного анализа и не позволяют осуществлять процедуру параметрической оптимизации смесителей. Работа посвящена разработке методики символьного анализа пассивных смесителей в базисе узловых потенциалов в обобщенном матричном виде для частотной области, позволяющей полностью формализовать алгоритм анализа для линейных и нелинейных характеристик, а также в значительной степени уменьшить порядок решаемых систем уравнений по сравнению с иными методами, что позволяет осуществлять процедуру оптимального параметрического синтеза смесителей различной схемотехнической реализации. Разработанная методика позволяет сформировать символьные выражения для расчета коэффициента передачи, развязок «вход-выход» и «гетеродин-выход», амплитуды третьей гармоники. С помощью разработанной методики анализа решена задача оптимального параметрического синтеза смесителей: сформированы условия максимизации коэффициента передачи и минимизации нелинейных искажений в зависимости от параметров схемы, в том числе внутренних параметров активных элементов; в символьном виде сформированы выражения для расчета параметров, при которых смесители обладают оптимальными характеристиками; в символьном виде сформированы

выражения для оценки предельно достижимых характеристик смесителей.

На основе предложенной методики осуществлен синтез пассивных смесителей на диодах и на транзисторах в диодном включении. Разница между результатами моделирования и результатами расчетов составляет 10–15%, что подтверждает эффективность разработанной методики. Разработаны компоновки кристаллов и изготовлены интегральные схемы четырех смесителей с оптимальными параметрами на основе 0,5 мкм GaAs-рHEMT-технологии: диодные смесители С-, Х-частотных диапазонов, смесители на транзисторах в диодном включении С-, Х-частотных диапазонов (рис. 1). Результаты измерений изготовленных микросхем представлены в таблице 1 и согласуются с результатами моделирования в пределах 1–1,5 дБ. Изготовленные смесители обладают оптимальными характеристиками, показано увеличение коэффициента передачи по сравнению с существующими работами [4, 5] для диодных смесителей на 1–5,5 дБ, для транзисторных смесителей на 6–10 дБ.

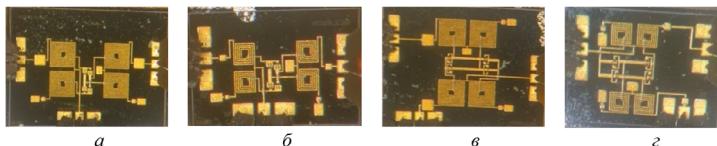


Рис. 1. (а) Кристалл диодного смесителя С-диапазона, (б) кристалл диодного смесителя Х-диапазона, (в) кристалл смесителя на транзисторах в диодном включении С-диапазона, (г) кристалл смесителя на транзисторах в диодном включении Х-диапазона

Таблица 1. Результаты измерений

	Диодный, С	Диодный, Х	Транзисторный, С	Транзисторный, Х
Частота входного сигнала, ГГц	2–6	6–16	2–6	6–12
Частота сигнала гетеродина, ГГц	2–6	6–16	2–6	6–12
Частота сигнала на промежуточной частоте, ГГц	DC–1,5	DC–1,5	DC–1,5	DC–1,5
Коэффициент передачи, дБ	–10,6–6,5	–11,6–7,8	–11,9–10,5	–9,1–7,5
Развязка «вход–выход», дБ	>27	>24	>26	>26
Развязка «гетеродин–выход», дБ	>40	>25	>29	>33
CP1dB, дБм	12	11	10	9
Монитор гетеродина, дБм	9–16	9–16	9–16	9–16

### Библиографический список

1. Henderson B., Camargo E. *Microwave mixer technology and applications* — New York: Artech House, 2013. — 877 p.
2. Богданович Б.М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. — М.: Связь, 1980. — 280 с.
3. Wambacq P., Sansen W. *Distortion analysis of analog integrated circuits*. — Kluwer Academic Publishers, 1998. — 501 p.
4. Y. Pu, Z. H. Huang, S. J. Pan, et al, “A 3 GHz to 10 GHz GaAs double balanced mixer,” in: Proceedings of 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, pp. 1083–1086, 2017.
5. K.-W. Yeom and D.-H. Ko, “A novel 60-GHz monolithic star mixer using gate-drain-connected pHEMT diodes,” //IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 53, no. 7, pp. 2435–2440, Jul. 2005.

# ПЛЕНОЧНЫЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

А.О. Ситникова\*, Р.М. Голубев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

\*sitnikova\_ao@spbstu.ru

Компьютерное моделирование датчиков физических величин представляет собой мощный инструмент для разработки и оптимизации конструкции, а также получения выходных характеристик этих устройств. В данной работе представлена цифровая модель тонкопленочного датчика температуры, состоящего из чередующихся термоэлементов из висмута и теллура, разработанная с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics. В качестве функциональных материалов выбраны  $\text{Bi}$  и  $\text{Te}$ , которые обладают высоким коэффициентом Зеебека (термо-ЭДС), высокой электропроводностью и низкой теплопроводностью, что способствует увеличению термоэлектрической добротности [1], значение которой определяет эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую. Задача физического моделирования решается на основе термоэлектрических уравнений, уравнения теплового баланса и уравнений Максвелла с использованием метода конечных элементов и применением мультифизического интерфейса. Данный интерфейс позволяет учитывать как отдельные процессы (распространение тепла, распределение потенциала), так и их взаимные влияния (джоулев нагрев, эффект Пельтье).

Моделирование позволяет исследовать влияние различных параметров, таких как толщина пленки, период чередования термоэлементов, диапазон рабочих температур и геометрия датчика, на температурную чувствительность датчика. Полученные результаты могут быть использованы для разработки высокочувствительных тонкопленочных датчиков температуры с улучшенными характеристиками.

В качестве подложки для пленочного датчика температуры на основе чередующихся термоэлементов из  $\text{Te}$  и  $\text{Bi}$  использована полиимидная пленка. Функциональные элементы датчика (пленки  $\text{Te}$  и  $\text{Bi}$ ) изготовлены методом вакуумного испарения с последующей конденсацией на подложку. На рис. 1 представлена модель, построенная в Comsol Multiphysics, и распределение температуры на элементах датчика.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости температуры различных составных частей датчика (рис. 2, *а*) и разности температур на его противоположных концах (рис. 2, *б*) от плотности протекающего через него тока. Распределение температур в элементах датчика не является равномерным (рис. 2, *а*). Для полного понимания этих результатов следует учесть температурные граничные условия. На частях датчика без контактных площадок поддерживается постоян-

ная температура 25°C (нормировка на комнатную температуру). На части датчика, содержащей контактные площадки, граничные условия не заданы, поскольку на ней температура изменяется.

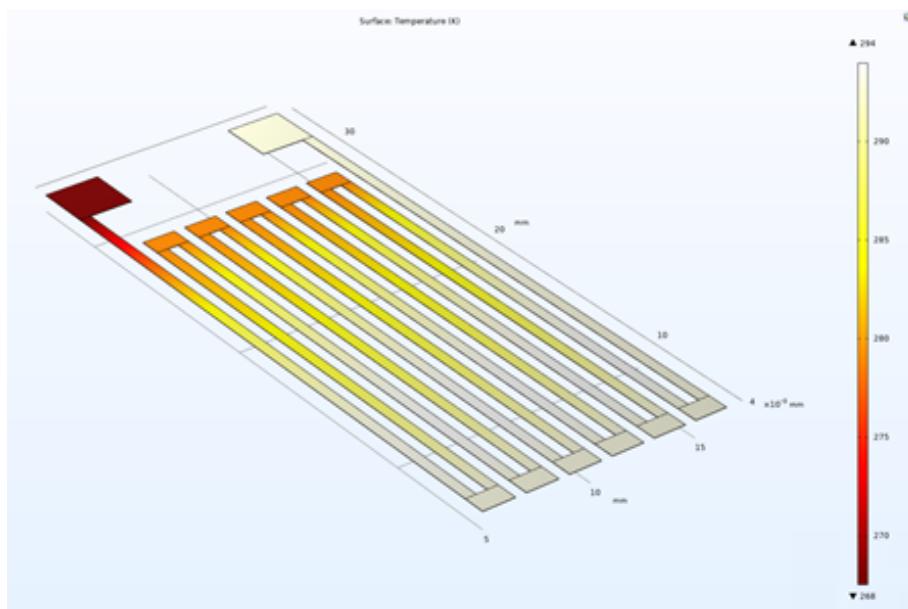


Рис. 1. Модель пленочного датчика и распределение температуры

Кривая 2 (рис. 2, а) имеет самый сильный перегиб. Снижение температуры до точки экстремума обусловлено влиянием эффекта Пельтье, дальнейшее увеличение – джоулевым нагревом. Точка минимума температуры соответствует значению плотности тока 30 мкА/мм<sup>2</sup>, при котором наблюдается максимум разности температур на концах датчика (см. рис. 2, б). Две другие кривые – для центральных (кривая 1) и крайних двух (кривая 3) термоэлементов – имеют меньший перегиб и меньшее снижение температуры. Это обусловлено тем, что измерялась средняя температура всего элемента. Однако можно заметить, что значение плотности тока, соответствующего минимальной температуре, ниже, чем для верхних спаев, а средняя температура всего элемента возрастает быстрее, чем температура его спаев. Отсюда следует вывод, что вклад в среднюю температуру термоэлемента дает как нагрев одного из его спаев за счет возникающего градиента температуры, так и общий нагрев всего элемента, связанный с протеканием по нему тока. Отметим, что кривая 3 (рис. 2, а) демонстрирует более интенсивный нагрев крайних термоэлементов, что обусловлено их большей длиной и отсутствием спая с элементом другого типа со стороны контактных площадок.

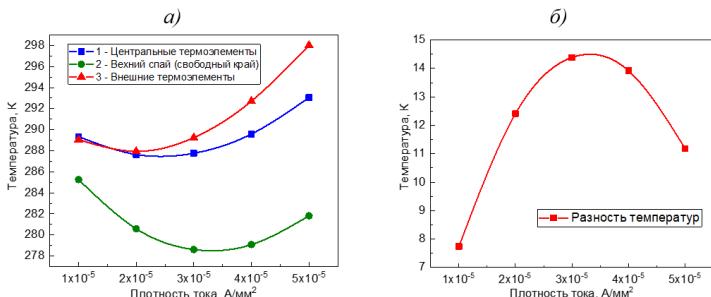


Рис. 2. Зависимости температуры различных составных частей датчика (а) и разности температур на его концах (б) от плотности тока

Как видно на рис. 2, б разница температур с ростом плотности тока изменяется немонотонно, а ее максимум (14.5 К) наблюдается при значении плотности тока, равном 30 мА/мм<sup>2</sup>. Это объясняется противодействующими друг другу эффектами – Пельтье и Джоуля-Ленца. При увеличении плотности тока, протекающего через датчик, в термоэлектрических элементах датчика возникает градиент температуры, обусловленный эффектом Пельтье, однако также присутствует и джоулев нагрев, который при увеличении плотности тока играет все большую роль, уменьшая температурный градиент. Отсюда можно сделать вывод, что при плотности тока  $\leq 30$  мА/мм<sup>2</sup>, эффект Пельтье будет давать наибольший вклад в образование градиента температур, без сильного перегрева за счет джоулевого тепла.

Таким образом, в ходе работы была разработана модель пленочного датчика температуры и получены распределения температуры на разных его элементах. Было обнаружено, что при значениях протекающего тока больших 30 мА/мм<sup>2</sup>, джоулев нагрев начинает доминировать над термоэлектрическим эффектом.

Авторы выражают благодарность к.т.н., ст.н.с., доценту Геворкяну Владимиру Арамовичу (Российско-Армянский университет, Ереван, Армения) за предложенную конструкцию датчика.

#### Библиографический список

1. Zhu H., Zhao J. Y., Xiao C. // Rare Metals. 2021. Vol. 40. №. 10. P. 2829–2837.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В ДВУМЕРНЫХ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ ПЕРМАЛЛОЯ

К.А. Гриценко<sup>1\*</sup>, В.К. Беляев<sup>1</sup>, З.А. Григорьева<sup>1</sup>,  
Т.А. Митрофанов<sup>1</sup>, Д.В. Мурзин<sup>1</sup>, В.В. Родионова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта,

г. Калининград, Россия

\*KByrka@kantiana.ru

Одной из важных прикладных задач в области магнитной сенсорики является повышение чувствительности датчиков, их миниатюризация и интеграция в устройства и приложения, включая биомедицинские [1]. Уменьшения шумов, повышения стабильности и долговечности, а также повышение точности в изменяющихся условиях окружающей среды также важно, например, для картирования магнитных полей.

В датчиках магнитного поля на магнитооптических эффектах [2] в качестве чувствительного элемента используются ферромагнитные пленки, например, из сплава пермаллоя. Проведение исследований магнитных свойств тонких пленок, таких как микромагнитная структура, распределение полей рассеяния, а также поведение намагниченности во внешнем магнитном поле, позволяет получить информацию о магнитной анизотропии и магнитных взаимодействиях в образце, что является важным при разработке сенсорных элементов и настройке их функциональных свойств.

Одномерные и двумерные магнитоплазмонные кристаллы используются в сенсорике, так как они позволяют наблюдать фотонные и магнитооптические эффекты, которые изменяются под действием внешнего магнитного поля.

В данной работе были исследованы процессы перемагничивания в двумерных магнитоплазмонных кристаллах на основе пермаллоя. Характеризация образцов на предмет описания морфологии поверхности была выполнена с помощью сканирующей электронной микроскопии и атомной силовой микроскопии. Высота рельефных элементов дифракционной решетки составила  $85 \pm 10$  нм. Латеральные размеры элементов решетки кристалла варьировались в зависимости от изменения дозы экспонирования электронорезиста от 200 мКл/См<sup>2</sup> до 600 мКл/См<sup>2</sup>, использовавшегося при изготовлении образцов методом электронно-лучевой литографии [3].

Полученные структуры демонстрируют влияние периода решетки магнитоплазмонного кристалла на процесс перемагничивания. В частности, при увеличении дозы экспонирования электронорезиста усиливается влияние магнитостатических взаимодействий в образце.

#### **Библиографический список**

1. *Wen B. et al. Top-down fabrication of ordered nanophotonic structures for biomedical applications //Advanced Materials Interfaces. – 2024. – T. 11. – №. 5. – C. 2300856.*
2. *Belyaev V. K. et al. Magnetic field sensor based on magnetoplasmonic crystal //Scientific Reports. – 2020. – T. 10. – №. 1. – C. 7133.*
3. *Murzin D. et al. Magnetic field sensing elements based on Ni80Fe20 2D magnetoplasmonic crystals //Sensors and Actuators A: Physical. – 2024. – T. 377. – C. 115773.*

# ОБЛАСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В Р-Н ПЕРЕХОДЕ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

В.И. Гусев<sup>1,2\*</sup>

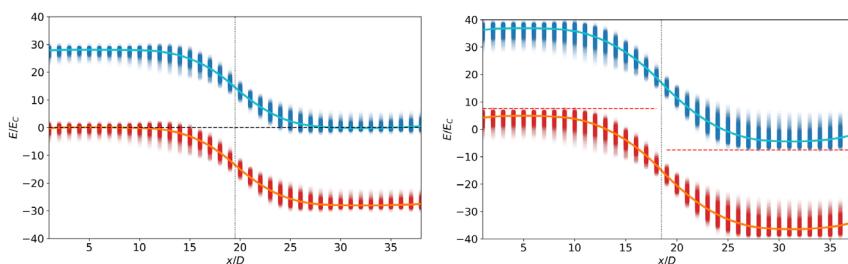
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup>СПбАУ им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

\*v.i.gusev@mail.ioffe.ru

Одним из направлений в разработке эффективных и доступных по стоимости фоточувствительных устройств является создание фоточувствительного элемента на основе р-п перехода, состоящего из квантовых точек (КТ), т.е. контакте слоев р- и н- и легированных КТ [1]. Такие точки созданы из полупроводниковых материалов (к примеру, CdSe) и имеют характерные размеры от 3 до 10 нм. Экспериментально получено, что в таких структурах темновой ток при обратном смещении слабо отличается по величине от тока при прямом смещении [2]. Предполагается, что это связано с формированием проводящего канала в массиве КТ за счет беспорядка — как геометрического (различия в размерах и расстояниях между квантовыми точками), так и в распределении легирующих примесей. Однако на текущий момент отсутствует общая теория, способная описать поведение подобных систем в зависимости от уровня легирования, размера, диэлектрической проницаемости и других параметров КТ.

В данной работе представлена теоретическая модель, описывающая р-п переход в массиве квантовых точек, которая учитывает геометрический беспорядок и беспорядок в распределении примесей. С помощью компьютерной симуляции были получены зависимость толщины области пространственного заряда от концентрации легирующих примесей и энергетические диаграммы р-п перехода в равновесном состоянии и приложенном обратном напряжении (рис. 1). Полученные результаты при слабом легировании квантовых точек согласуются с теорией для классического полупроводникового р-п перехода. Также в рамках данной модели были получены плотности состояний, в которых наблюдается кулоновская щель, являющаяся следствием беспорядка в распределении легирующих примесей в соответствии с критерием Эфроса-Шкловского [3].



*Рис 1. Пример энергетических диаграмм р-п перехода на КТ. Слева представлена система в равновесном состоянии, справа — при приложенном внешнем обратном напряжении  $V=15E_c/e$ .  $E_c$  — энергия зарядки квантовой точки,  $D$  — диаметр квантовой точки. Для каждой квантовой точки рассчитаны состояния в зоне проводимости и валентной зоне, которые обозначены синими и красными точками соответственно. Черная пунктирная горизонтальная линия соответствует уровню Ферми в равновесии, красные пунктирные линии — квазиуровням Фурми для р- и п-областей*

#### **Библиографический список**

1. V. P. Ponomarenko, V. S. Popov, I. A. Shuklov, V. V. Ivanov, V. F. Razumov, // *Russian Chemical Reviews*, 2024, V. 93, RCR5113
2. V. S. Popov, et al. // *Technical Science*, 2023, V. 68, P. 233–236
3. B. I. Shklovskii and A. L. Efros // *Electronic Properties of Doped Semiconductors*, Springer, 1984, p. 395.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ МЕМРИСТИВНОГО НАНОСЛОЯ $\text{TiO}_x$ НА КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКЕ $\text{Au}^x$**

**Т.З. Гусейнов <sup>1\*</sup>, О.Р. Бакиева <sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,

*Ижевск, Россия*

*\*timurguseinoff@yandex.ru*

Мемристор — это пассивный электронный компонент, который способен изменять свое сопротивление в зависимости от протекшего через него электрического заряда. Этот элемент электроники был теоретически предсказан Леоном Чуа в 1971 году, а практически реализован лабораторией компании HP в 2008 году [1]. Уникальные свойства мемристивных устройств делают их кандидатами для создания нового поколения энергонезависимой памяти и нейроморфных вычислительных систем [2]. Актуальность применения мемристоров заключается в их способности имитировать работу биологических нейронов, что открывает новые возможности в развитии нейроморфных систем и создании «искусственного» мозга [3-5]. Это направление исследований в нынешнее время наиболее востребовано. Кроме того, к преимуществам мемристивных устройств относится энергонезависимость и возможность совмещать хранение и обработку данных в одном элементе.

Принцип работы устройства основан на формировании токопроводящих нитей внутри рабочего слоя и перемещении вакансий кислорода при приложении электрического поля. Базовая структура мемристивного устройства включает в себя следующие компоненты: два металлических электрода, для подачи электрического тока, и функциональный слой. Электроды в основном состоят

из золота или платины, а функциональный слой может состоять из различных материалов. Чаще всего используются нестехиометрические оксиды металлов, например, титана, в виде пленок нанометровой толщины. Также в качестве рабочего слоя используются многослойные системы, состоящие из слоев различных по толщине и составу материалов. В процессе работы устройства кислородные вакансии в системе металл-оксид-металл взаимодействуют с кислородом в атмосфере и может происходить внедрение в структуру рабочего слоя, при этом их количество уменьшается. Таким образом, с течением времени нестехиометрические оксиды доокисляются до стабильного состояния, что препятствует движению вакансий кислорода и свойства мемристивного слоя теряются. К настоящему моменту проблема деградации функциональных слоев остается не решеной. Имеющиеся на данный момент сведения о процессах окисления металлов в основном относятся к объемным объектам и не учитывают размерный эффект в случае нано-пленок, использующихся в мемристивных технологиях.

Целью настоящей работы является исследование процесса окисления тонких пленок, сформированных из нестехиометрических оксидов титана. Проведено исследование наноразмерных пленок  $TiO_x$  и функционального мемристивного слоя  $TiO_x$  на контактной площадке из золота. Определены изменения в элементном составе и химическом состоянии происходящие в мемристивном слое за 60 дней выдержки в атмосфере при нормальных условиях. Качественный и количественный анализ пленок проводился методом Оже-электронной спектроскопии (ОЭС) в комплексе с профилированием ионами аргона энергией 3 кэВ. ОЭС является поверхностно-чувствительным методом исследования, глубина выхода оже-электронов 1-3 нм, чувствительность составляет 1 at. %. Используя распыление поверхности низкоэнергетическими ионами аргона, получена информация о распределении химических элементов по всей толщине пленок. Глубина профилирования определялась методом атомно-силовой микроскопии. Были построены профили распределения химических элементов в зависимости от глубины профилирования.

#### **Библиографический список**

1. Strukov, D., Snider, G., Stewart, D. et al. // *Nature*. 2008. V. 453. P. 80.
  2. Васильева Д. С., Пионтковская С. А. // *Вестник науки*. 2024. Т. 2. №. 7. С. 403.
  3. Sun K., Chen J., Yan X. // *Advanced Functional Materials*. 2021. V. 31. №. 8. P. 2006773.
  4. Aguirre F. et al. // *Nature communications*. 2024. V. 15. №. 1. P. 1974.
- Liu Z. et al. // *Nature Electronics*. 2025. P. 1.

# СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕТЕРОГРАНИЦЫ

$\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$

А.Ю. Иванов<sup>1\*</sup>, Ш.Ш. Шарофидинов<sup>2</sup>, М.В. Дорогов<sup>1</sup>,  
А.М. Смирнов<sup>1</sup>, А.Е. Романов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*aiivanov@itmo.ru

Оксид галлия ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) – сверхширокозонный полупроводниковый материал, который может существовать в нескольких полиморфных формах [1]. Наиболее термически стабильной формой является моноклинная  $\beta$ -фаза с шириной запрещенной зоны  $E_g \approx 4,85$  эВ. В последние годы возрос интерес к метастабильным фазам оксида галлия, в частности, к орторомбической  $\kappa$ -фазе с  $E_g \approx 4,90$  эВ, обусловленный высокой спонтанной поляризацией материала [2] и его кристаллической структурой, позволяющей получать кристаллически совершенные пленки  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  на подложках из нитридов металлов III группы – основы компактных приборов силовой электроники нового поколения [3].

В настоящем исследовании определены структурные характеристики пленок  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , полученных методом хлоридгидридной газофазной эпитаксии на подложках  $\text{GaN}/\text{SiC}/\text{Si}$ . Отдельное внимание уделено гетерогранице  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ . С помощью методов рентгеновской дифракции установлена псевдогексагональная кристаллическая структура пленок на основе орторомбической фазы  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . С помощью методов сканирующей электронной микроскопии выявлено присутствие V-образных дефектов на гетерогранице  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ , размеры которых варьировались от единиц нм до десятков мкм, а их плотность составляла  $\sim 10^6 \text{ м}^{-2}$ . Присутствие подобных дефектов влияет на обратный ток утечки, напряжение пробоя и на механическое поведение гетероструктуры [4], что, как правило, негативно скаживается на характеристиках конечных приборов на основе таких гетероструктур. Показано, что заращивание V-дефектов на границе раздела оксидом галлия позволяет избежать деградации функциональных свойств гетероструктуры и позволяет использовать последние в мощных, высокочастотных электронных устройствах и детекторах глубокого ультрафиолета.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0005).

## Библиографический список

1. Roy R., Hill V. G., Osborn E. F. // *Journal of the American Chemical Society*. 1952. V. 74. No. 3. PP. 719-722.
2. Cho S. B., Mishra R. // *Applied Physics Letters*. 2018. V. 112. No. 16.
3. Leone S., Fornari R., Bosi, M., Montedoro V., Kirste L., Doering P., Ambacher O. // *Journal of Crystal Growth*. 2020. V. 534. P. 125511.
4. Baek S. H., Choi D. C., Kim Y. S., Na H., Lee S. N. // *Photonics. MDPI*, 2023. V. 10. – No. 10. P. 1103.

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДА НА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕЕК ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$

С.В. Ильев<sup>1</sup>, И.А. Мутаев<sup>1</sup>, М.В. Спиридовон<sup>1</sup>,  
А.А. Чуприк<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, 141701, Россия

\*chouprik.aa@mpt.ru

Тонкие сегнетоэлектрические пленки легированного оксида гафния являются перспективным материалом для разработки энергонезависимой памяти нового поколения [1]. Достоинствами данного материала является идеальная совместимость с современной кремниевой технологией, а также большой потенциал к масштабированию вплоть до нанометровых толщин, при сохранении остаточной поляризации. Оксид гафния является полиморфным материалом. Из-начально пленки, выращенные методом атомно-слоевого осаждения, являются аморфными, и для кристаллизации осажденной пленки требуется последующий отжиг. Стабильной структурной фазой является неполярная моноклинная фаза. При высоких температурах происходят фазовые переходы в тетрагональную и кубическую структурные фазы. Эти фазы неполярны, но являются родительскими фазами полярной орторомбической  $Pca2_1$  фазы. Орторомбическая фаза метастабильна, и эффективность её стабилизации зависит от ряда факторов: толщины пленки, материала электродов и подложки, температуры и длительности отжига, типа и концентрации легирующей примеси. К настоящему моменту не существует исчерпывающего понимания роли всех параметров структур и технологических процессов их изготовления на сегнетоэлектрические свойства данного материала.

В данной работе показано, что макро- и микроскопические свойства пленок  $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$  толщиной 10 нм существенно зависят от размера зёрен электродов ячейки памяти, и исследована связь между величиной остаточной поляризации и доменной структурой. Было изготовлено четыре типа функциональных структур  $Si/W/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2/Pt$ , отличающихся только скоростью распыления Pt, выступающей в качестве верхнего электрода, методом импульсного лазерного напыления. Технологический процесс заключался в следующем. На кремниевой подложке методом магнетронного напыления был сформирован нижний W электрод,  $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$  был выращен методом атомно-слоевого осаждения, а верхний Pt электрод – методом импульсного лазерного осаждения. Для стабилизации полярной орторомбической фазы был выполнен быстрый термический отжиг в течение 30 с при температуре 550 °C в атмосфере Ar.

$P-V$  кривые (рис. 1) были измерены методом PUND (positive-up negative-down) с помощью анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500A, а исследование трансформации доменной структуры при переключении поля-

ризации – с помощью *in situ* силовой микроскопии с полосовым возбуждением с автоподстройкой резонансной частоты, реализованной в атомно-силовом микроскопе NT-MDT Ntegra. Для анализа зёрен был использован растровый электронный микроскоп JEOL JSM 7001F.

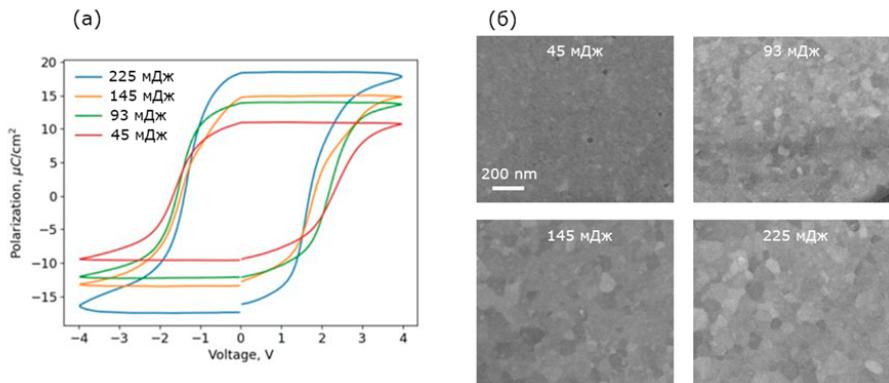


Рис. 1. (а) Р-В кривые ячеек памяти при различной энергии импульсов, используемых при напылении верхнего электрода; (б) РЭМ изображения поверхности Pt электродов.

При максимальной энергии Pt атомов при напылении пленки верхнего электрода наблюдалось образование крупных зёрен (около 150 нм) и крупных доменов в  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$  (200-300 нм), что приводит к максимальной остаточной поляризации 22 мкКл/см<sup>2</sup>. При минимальной энергии наблюдаются мелкие зёरна (около 10 нм) и мелкие домены (20-50 нм), при этом поляризация составляет 13 мкКл/см<sup>2</sup>. На начальном этапе работы ячейки наблюдается пиннинг доменов при переключении поляризации, что ещё сильнее уменьшает остаточную поляризацию. При промежуточных значениях энергии наблюдаются промежуточные размеры зёрен, доменов и поляризации. Предполагаемым механизмом влияния размера Pt зёрен является различная длина границ зёрен, прозрачных для атомов кислорода, и, как следствие, различная плотность вакансий кислорода в  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ . Как известно, высокая плотность вакансий кислорода стимулирует стабилизацию орторомбической фазы в оксиде гафния.

Результаты указывают на возможность инженеринга функциональных свойств ячеек сегнетоэлектрической памяти  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$  путем оптимизации технологического процесса изготовления верхнего электрода.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (Соглашение № 075-03-2025-662, проект FSMG-2025-0025).

#### Библиографический список

1. Böscke T.S., Müller J., Brauhaus D., Schröder U. et al. // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99, № 10. P. 102903.

# НРНТ АЛМАЗ С NV-ЦЕНТРАМИ ДЛЯ КВАНТОВОЙ СЕНСОРИКИ

И.В. Клепиков<sup>1,3\*</sup>, А.В. Колядин<sup>2</sup>, Р.В. Исаков<sup>2</sup>,  
О.С. Бохов<sup>2</sup>, В.Г. Винс<sup>4</sup>, Е.А. Васильев<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПК «Алмаз», Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> ООО «Нью Даймонд Технолоджи», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> РТУ МИРЭА, Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО, «ВЕЛМАН», Новосибирск, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*Klepikov\_Igor@mail.ru

В последние годы наблюдается всплеск патентной активности в области создания приборных структур на монокристаллических алмазных подложках с азот-вакансационными NV—центрами. Квантовые компьютеры, микроскопы, гироскопы и магнитометры являются основными приборами, созданными на базе подложек данного типа [1]. Такие крупные оборонные корпорации и агентства США как «Lockheed Martin», «DARPA» активно создают патенты в области микроэлектроники и квантовой сенсорики на алмазных подложках [2]. Мировыми лидерами в области производства алмаза «квантового качества» являются компании «Element Six», «Panasonic», «Sumitomo», «GE», «Diamond Foundry», а также университеты и научные центры Америки, Китая и Японии. В данной работе представлены экспериментальные результаты по созданию квантовых элементов из НРНТ алмаза, а также исследованию их спектроскопических характеристик.

Образцы произведены ООО «Нью Даймонд Технолоджи», совместно с ООО «НПК «Алмаз» из монокристаллов НРНТ алмаза типа Ib, выращенных в системе Fe-Co-C при температуре  $\sim 1450^{\circ}\text{C}$  и давлении  $\sim 6,5$  Гпа, с заданной концентрацией одиночного азота (от 1 до 80 ppm). Кристаллографическая ориентация элементов -  $\langle 100 \rangle$ , размеры квантовых элементов  $\sim 1 \times 1 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>. Для формирования центров окраски NV по всему объему образцы были облучены электронами с энергией 3 МэВ в дозами  $0,1\text{--}2,0 \times 10^{18}$  см<sup>-2</sup> в ООО «ВЕЛМАН» (г. Новосибирск), а затем отожжены при температуре  $1200^{\circ}\text{C}$ .

В образце № 1 исходная концентрация одиночного азота составляла  $\sim 5$  ppm, в образце № 2  $\sim 70$  ppm. После радиационно-термической обработки образцов были зарегистрированы их спектры поглощения в видимой области, а также получены изображения фотолюминесценции (ФЛ) при возбуждении источниками с длиной волны 220, 254 и 365 nm (Рис. 1). Установлено, что в разных диапазонах УФ излучения полученные образцы ведут себя принципиально по-разному: при экспонировании на длине волны 220 nm оба образца демонстрируют однородную оранжевую ФЛ, при 254 nm - образец № 2 светится значительно слабее, а при 365 nm - наблюдается принципиально отличная картина для двух

образцов: образец №1 испускает яркое желто-оранжевое свечение, образец №2 обладает тусклой фиолетовой зональной ФЛ.

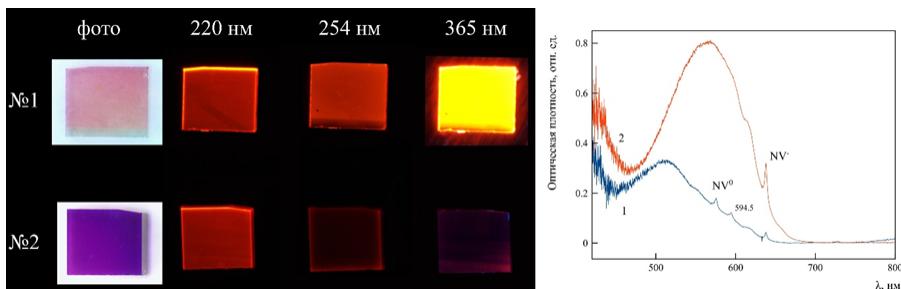


Рис. 1. Изготовленные и исследованные квантовые элементы №1 и №2: а) Фото и изображения в 220, 254, 365 нм б) спектры поглощения (оптической плотности) в видимой области.

Мы связываем эти особенности с взаимодействием, концентрацией и соотношением центров С, С<sup>+</sup>, NV<sup>0</sup>, NV. В образце № 1 основная часть азота перешла в форму NV дефектов в нейтральном зарядовом состоянии, которые и обуславливают яркую оранжевую люминесценцию. При высокой степени конверсии С дефектов в NV такой алмаз становится скомпенсированным полупроводником. В образце № 2 основная часть азота перешла в форму NV дефектов в отрицательном зарядовом состоянии, для компенсации заряда соответствующая часть С центров перешла в положительное зарядовое состояние, но донорный тип проводимости сохранился. Таким образом, номинально близкие по технологии роста и постстроковой обработки образцы могут иметь существенно различные характеристики, обуславливающие их применимость в различных приложениях квантовой сенсорики.

#### Библиографический список

1. J. Achard, V. Jacques, A. Tallaire // J. Phys. D Appl. Phys. 2020. 53, 29 313001.
2. United States Patent No.: US 10,725,124 B2. Boesch et al. 2020.

## ЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНОСИЛОКСАНОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

### Е.И. Климова<sup>1\*</sup>, О.О. Молоканова<sup>1</sup>, Г.О. Молоканов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

\*EIKlimova@kantiana.ru

Силоксаны обладают высокой эластичностью и способностью восстанавливать свою форму после деформации, термо- и химически стабильны, не токсичны и биосовместимы, что делает их перспективными для создания элементов гибкой электроники [1, 2]. Необходимая электропроводность достигается введением в силоксановую матрицу высокодисперсных углеродных наполнителей.

Силикон, модифицированный техническим углеродом и одностенными нанотрубками, был изготовлен в НОЦ «SmartTextiles». Образцы представляли собой жгуты квадратного сечения длиной 5 см с алюминиевыми контактными электродами.

Измерение электропроводимости осуществлялось потенциостатом Р-40Х с модулем измерения электрохимического импеданса FRA-24M в гальваниостатическом режиме по четырехточечной схеме включения с использованием заземленной экранирующей камеры. Измерения проводились при комнатной температуре.

На рис. 1 приведен характерный вид частотной зависимости полного импеданса от электрического сигнала синусоидальной формы на примере образца, содержащего 1% концентратра протяженных углеродных нанотрубок.

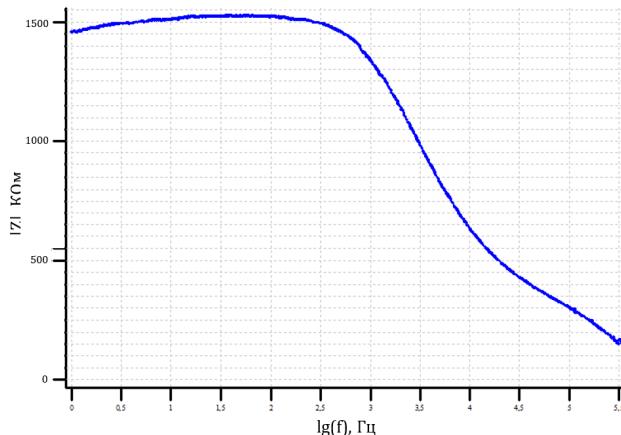


Рис. 1. Характерный вид зависимости полного импеданса от частоты гармонического электрического сигнала

Частотные зависимости полного импеданса, а также активного и реактивного сопротивления изготовленных образцов показали, что все исследованные составы полиоргансилоксановых композитов обладают достаточно высоким полным комплексным сопротивлением. При этом, введение в композит 5% гибридного наполнителя сферической формы во всех случаях не только способствует значительному снижению общего сопротивления, но и существенно меняет характер поведения образцов под воздействием синусоидально напряжения.

Построение диаграмм активного и реактивного сопротивления в координатах  $Re(Im)$  с частотой в качестве независимого параметра, осуществленное с помощью программного обеспечения потенциостата-гальваностата P-40X, и сходство формы полученных диаграмм (рис. 2) с классическими диаграммами Коул-Коула [3, 4] с одним дипольным релаксантом, показывает возможность дальнейшего расширения исследования для определения диэлектрических параметров исследованных композитов, таких как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

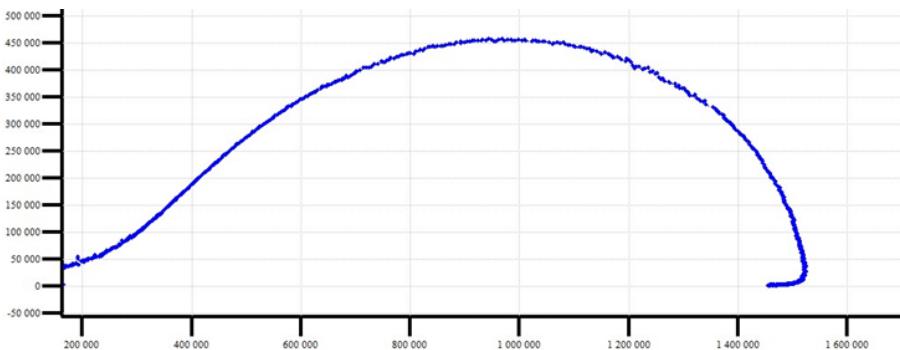


Рис. 2. Характерный вид диаграммы полного комплексного сопротивления

Все образцы, содержащие в составе только силиконовую матрицу и углеродные частицы протяженной формы, показывают преимущественно реактивный характер сопротивления. Увеличение концентрации однослойных углеродных нанотрубок для исследованных составов приводит к общему снижению сопротивления. При этом композиты продолжают проявлять преимущественно диэлектрические свойства.

Для образцов также были измерены электрическое сопротивление и геометрические параметры, и рассчитано удельное объемное электрическое сопротивление. Корреляции удельного сопротивления с концентрацией углеродного наполнителя не выявлено.

В исследуемых композитах диполями-релаксантами являются полярные группы, имеющие различное окружение, и их время релаксации может колебаться в определенных пределах. В дальнейшем, зная групповые дипольные моменты и групповые вклады в мольную поляризацию, будет возможно рассчитать общий эффективный дипольный момент полимерного звена силоксановых композитов.

Для изучения поведения электрических характеристик исследованных композитов при воздействии механических деформаций некоторые образцы были подвергнуты растяжению на универсальной испытательной машине Instron 34TM-10 с одновременным измерением электросопротивления. Деформация

растяжения, не превышающая 60% для каждого из исследованных образцов, увеличивает их сопротивление не более чем на один порядок.

Проведенные исследования позволяют предположить возможность применения изученных композитных составов полиоргансилкозанов в микроэлектронных устройствах биомедицинского назначения, подвергающихся механическим деформациям в процессе эксплуатации.

#### **Библиографический список**

1. *Vafaei, M.; Ejehi, F.; Mohammadpour, R. // Sci Rep 2023, 13: 370.*
2. *Li, Y.; Ai, Q.; Mao, L. et al. // Sci Rep 2021, 11: 210062.*
3. *V. T. Avanesyan, M. Yu. Puchkov // Bulletin of the Herzen State Pedagogical Univ. 2009, no. 95, P. 39-45*
4. *Lushcheykin G. A // Methods for studying the electrical properties of polymers Moscow: Chemistry. 1998*

## **ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ МИ-РЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ**

**А. Кузнецов<sup>1,3\*</sup>, А.А. Кутузова<sup>2</sup>, В.М. Кондратьев<sup>1,3</sup>,  
В.В. Федоров<sup>3</sup>, А.Д. Большаков<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия;

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

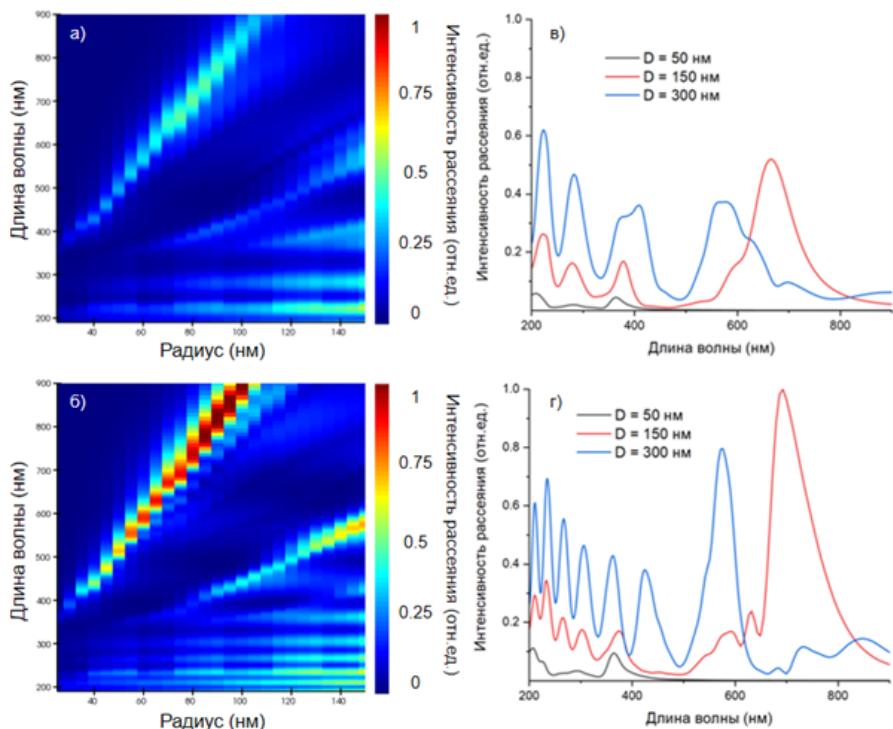
<sup>3</sup> СПбАУ им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

\*alkuznetsov1998@mail.com

Данная работа посвящена исследованию резонансных свойств вертикальных массивов epitаксиальных нитевидных нанокристаллов фосфида галлия. Условия наличия Ми-резонансов вnanoструктурах диктуются геометрией структуры и оптическими свойствами материала. Материал должен обладать высоким показателем преломления и низким поглощением для обеспечения высокой добротности. Фосфид галлия (GaP) представляет из себя хорошую кандидатуру в виде высокого показателя преломления (>3), широкого окна прозрачности (0,5-11 мкм), низкого двухфотонного поглощения, высокого нелинейного отклика. Ранее были продемонстрированы резонансные свойства nanoструктур на основе GaP, в частности наночастиц [1], цилиндрических димеров [2]. С точки зрения синтеза регулярных массивов Ми-рассеивателей технология должна обеспечивать точный контроль геометрии и химического состава. Молекулярно-пучковая epitаксия (МПЭ) является очень точным методом, позволяющим выращивать GaP в виде нитевидных нанокристаллов (ННК) на стандартных кремниевых подложках [3,4]. Прецизионный контроль потоков атомарно чистых материалов позволяет выращивать как плотные, так и разряженные массивы в диапазоне

диаметров 40-1000 нм и длин 0,5-50 мкм.

Для анализа резонансных свойств ННК GaP в первую очередь было необходимо рассчитать сечение рассеяния для наноструктур различной геометрии в широком диапазоне продольных и латеральных размеров. Расчеты производились методами численного моделирования, а именно методами конечных разностей во временной области (finite-difference time-domain - FDTD) по алгоритму Йии [5] в программном обеспечении Ansys Lumerical. Геометрия ННК GaP была смоделирована правильными шестиугольными на кремниевой подложке. Под диаметром ННК подразумевается диаметр описанной окружности шестиугольника. Для численного расчета пространство было дискретизовано трехмерной прямоугольной неравномерной сеткой с минимальным шагом 2 нм. Расчетная область имела размеры 3х3х3 мкм<sup>3</sup> для обеспечения полного затухания эманесцентных рассеянных электромагнитных полей и отсутствия артефактов расчета. В качестве граничных условий на всех границах области расчета был установлен «идеально согласованный слой» (perfectly-matched layer) или PML для того, чтобы избавиться от паразитного отражения на границах расчетной области. Расчеты спектров рассеяния производились в спектральном диапазоне 200-1000 нм. На Рис. 1. представлены расчетные карты нормированной интенсивности



рассеяния от вертикальных ННК GaP на кремниевой подложке.

*Рис. 1. Расчетные карты нормированной интенсивности рассеяния ННК GaP в диапазоне диаметров 50-300 нм при длине а) 500 нм и б) 1000 нм; в-г) спектры рассеяния для диаметров 50, 150 и 300 нм для соответствующих им длин ННК GaP*

Как можно увидеть по расчетным картам, существуют 1-2 основные рассеивающие моды и различное количество менее интенсивных мод, количество которых увеличивается с увеличением длины ННК GaP. На спектрах данные моды особенно выражены в диапазонах 200-500 нм для длины ННК 500 и 1000 нм. Увеличение их количества, уменьшение межмодового расстояния с увеличением длины ННК свидетельствует о том, что данные моды являются модами Фабри-Перо, а торцевые грани ННК выступают как плоско-параллельные зеркала. Также очевидна тенденция к увеличению абсолютных значений сечений рассеяния с увеличением длины ННК GaP: при сравнении максимальных значений для длины ННК 250 и 1000 нм наблюдается четырехкратное увеличение интенсивности рассеяния. Оптическая темнопольная микроскопия была реализована на базе прямого оптического микроскопа RX50M, модифицированного для измерения спектров рассеяния. Темнопольные оптические изображения массива ННК GaP, выполненные на 10-кратном увеличении, демонстрируют наличие областей, различающихся по цвету. Для более детального анализа резонансных свойств были измерены спектры рассеяния. Измеренные спектры рассеяния имеют ярко выраженный пик, который, в случае зеленой области, расположен на длине волны 528 нм, а в случае желто-оранжевой - 564 нм. Расчетные спектры рассеяния ННК GaP диаметром 105 и 115 нм продемонстрировали спектральные особенности, которые полностью совпадают с экспериментальными. Данный факт подтверждает наличие интенсивных Ми-резонансов в ННК GaP, а также их спектральный сдвиг в разных областях подложки ввиду неоднородности диаметра ННК.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант 24-12-00225).

#### **Библиографический список**

1. *Shima D. et al. // Advanced Optical Materials. 2023. V. 11(12). P. 2203107.*
2. *Sortino L. et al. // Nature communications. 2019. V. 10(1). P. 5119.*
3. *Chan Y. F. et al. // Applied Physics Letters. 2003. V. 83(13). P. 2665-2667.*
4. *Fedorov V. V. et al. // Semiconductors. 2018. V. 52. P. 2092-2095.*
5. *Taflove, A., Hagness, S. C., & Piket-May, M. // The Electrical Engineering Handbook. 2005. V. 3(15). P. 629-670.*

# ВКЛАД ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕХАНИЗМ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТИТАНАТА БАРИЯ

М.В. Левичев<sup>1\*</sup>, О.Ю. Вилков<sup>2</sup>, Н.В. Андреева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

<sup>2</sup> СПбГУ 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

\*kurchatovsci@gmail.com

Энергонезависимое изменение резистивного состояния в тонких пленках сегнетоэлектрического (СЭ) титаната бария под воздействием внешнего электрического поля обусловлено совместным влиянием точечных дефектов анионной подрешетки, СЭ-поляризации и особенностей приэлектродных областей [1], что отражается на электронной структуре ионов, образующих пленку.

Наличие кислородных вакансий можно определить экспериментально по сдвигу фотоэлектронных линий оставших уровней катионов в рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Сравнение экспериментальных данных с расчётами в рамках теории функционала плотности (ТФП) позволяет оценить вклад кислородных вакансий, приэлектродных областей и СЭ-поляризации в электронную структуру пленки.

В работе исследованы РФЭ-спектры оставших уровней тонкой пленки титаната бария в структуре  $\text{SrTiO}_3$  (моноокристаллическая подложка)/ $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (нижний электрод, 10 нм)/ $\text{BaTiO}_3$  (~5 нм). Эпитаксиальная структура подтверждена рентгеновской дифракцией, толщина измерена рентгеновской рефлектометрией, а сегнетоэлектрические свойства — методами атомно-силовой микроскопии пьезоотклика. Стехиометрия  $\text{BaTiO}_3$  определена РФЭС, и дефицит кислорода относительно титана составил ~10–15%.

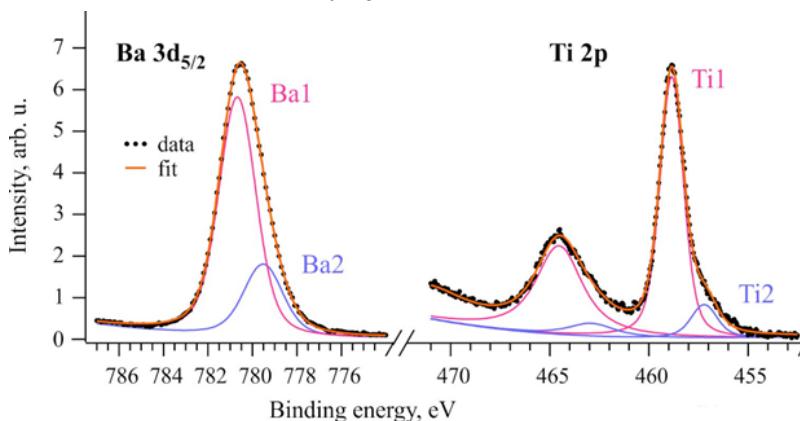


Рис. 1. РФЭС-спектры дублетов  $\text{Ba}3d$  и  $\text{Ti}2p$

Для интерпретации спектров выполнены расчёты электронной структуры модели  $\text{BaTiO}_3$  с  $\text{BaO}$ - и  $\text{TiO}_2$ -терминацией в программе WIEN2k [2]. Моделировались плёнки толщиной 5,2 нм с вакуумным зазором 5 нм, использовался функционал PBEsol. Для учёта влияния точечных дефектов рассмотрена суперячейка  $2\times2\times2$  тетрагональной фазы  $\text{BaTiO}_3$  с кислородной вакансией. СЭ-поляризация рассчитана методом фазы Берри.

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования показало, что дополнительный дублет в спектрах  $\text{Ba}3d$  (компоненты  $\text{Ba}1$  и  $\text{Ba}2$  на рис. 1) и  $\text{Ba}4d$  объясняется совместным действием  $\text{BaO}$ -терминации поверхности и СЭ-поляризации. Кислородные вакансии снижают энергию связи  $2p$ -электронов титана и приводят к частичному восстановлению  $\text{Ti}$  до  $\text{Ti}^{3+}$  (компоненты  $\text{Ti}2$  на рис. 1). Это подтверждается расчётами для суперячейки  $2\times2\times2$  с вакансией в  $\text{BaO}$ -слое, что согласуется с РФЭС-данными.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2025-0005.

#### Библиографический список

1. *N. V. Andreeva, E. A. Ryndin, A. E. Petukhov, O. Y. Vilkov and A. A. Al-Saman // Adv. Electron. Mater. 2024, 10, 2300806.*
2. *P. Blaha, K. Schwarz, F. Tran, R. Laskowski, G. K. H. Madsen and L. D. Marks // J. Chem. Phys. 2020, 152, 074101.*

## ИЗБИРАТЕЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВАНАДАТОВ ИНДИЯ И ВИСМУТА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ И ИНЕРТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Я.М. Можаров<sup>1,2\*</sup>, А.В. Марикуца<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*yarik.mozh@gmail.com

Газовые сенсоры имеют большое практическое значение. Они используются в контроле токсичных выбросов в окружающую среду, контроле качества воздуха в помещении, обнаружении пожара, контроле качества пищи и медицинской диагностике [1]. Полупроводниковые газовые сенсоры обладают преимуществами высокой чувствительности к следовым концентрациям газов, стабильности, дешевизны и простоты эксплуатации. Тем не менее, они не лишены недостатков, самыми значимыми из которых являются высокая рабочая температура и низкая селективность [2]. Одним из возможных способов решения проблемы

низкой селективности является переход к газовым сенсорам на основе сложных оксидов металлов. За счёт наличия различных катионов в структуре сложного оксида на поверхности материала присутствуют разнообразные активные центры, что позволяет добиться более специфичного взаимодействия с газами и, как следствие, более высокой селективности [3]. На данный момент, газовая чувствительность полупроводниковых сложных оксидов с шеелитоподобными структурами остаётся не изученной.

Целью данной работы является определение влияния состава сложных оксидов на газовую чувствительность на примере  $\text{InVO}_4$  и  $\text{BiVO}_4$ , по сравнению с простыми оксидами  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{V}_2\text{O}_5$  как образцами сравнения, определение механизма взаимодействия сложных оксидов с токсичными газами ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ , летучие органические соединения,  $\text{NO}_2$ ) и влияния состава атмосферы на газовую чувствительность.

Образцы  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{BiVO}_4$ -tz были получены методом осаждения, а образцы  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{InVO}_4$  и  $\text{BiVO}_4$ -ms – гидротермальным методом. Согласно результатам рентгеновской дифракции, выбор метода синтеза определяет кристаллическую структуру  $\text{BiVO}_4$ : образец  $\text{BiVO}_4$ -tz представляет собой преимущественно тетрагональную фазу дреерита, а  $\text{BiVO}_4$ -ms – моноклинную фазу клинобисванита.

На основе образцов были изготовлены газовые сенсоры и проведены измерения зависимости сопротивления от концентрации анализируемого газа в температурном диапазоне 100–300 °C. По результатам данных измерений,  $\text{InVO}_4$  и  $\text{BiVO}_4$  обладают более высокой газовой чувствительностью к токсичным газам-восстановителям, чем простые оксиды, а  $\text{V}_2\text{O}_5$  практически не чувствителен к анализируемым газам.  $\text{InVO}_4$  обладает высокой селективностью к  $\text{NO}_2$  при температуре 150 °C. Сенсорный отклик  $\text{InVO}_4$  к 1 ppm  $\text{NO}_2$  в два раза превышает отклик  $\text{In}_2\text{O}_3$ , а также не зависит от относительной влажности до 60%. С помощью *in situ* ИК-спектроскопии диффузного отражения было показано, что на поверхности  $\text{InVO}_4$  помимо образования  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$  протекает реакция восстановления  $\text{NO}_2$  до  $\text{NO}$ :

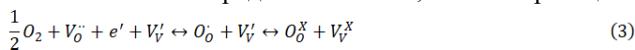


Протеканию данной реакции, вероятно, способствовало большое количество кислородных вакансий в структуре  $\text{InVO}_4$ . Данная реакция является предполагаемой причиной более высокой газовой чувствительности  $\text{InVO}_4$  к  $\text{NO}_2$  по сравнению с  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Сенсоры  $\text{BiVO}_4$ -ms и  $\text{BiVO}_4$ -tz обладают высокой селективностью к  $\text{H}_2\text{S}$  при температурах 100 и 200 °C, соответственно, а при температуре 300 °C данные сенсоры обладают высокой чувствительностью к ацетону. Установлено, что взаимодействие  $\text{BiVO}_4$  с газами-восстановителями осуществляется благодаря решеточному кислороду, входящему в структурные фрагменты  $\text{VO}_4$ :



Для определения участия кислорода в электрической проводимости и определения поверхностных форм кислорода были проведены измерения зависимости сопротивления от парциального давления кислорода при температуре 100–300 °С. Из полученных данных были рассчитаны константы скорости и энергия активации взаимодействия кислорода с материалами, соотношения числа электронов полупроводника и молекул адсорбата, а также были предложены реакции взаимодействия. Установлено, что проводимость  $V_2O_5$  не зависит от давления кислорода при  $T > 200$  °С и  $p_{O_2} > 0,025$  бар, что согласуется с его низкой газовой чувствительностью. Для  $InVO_4$  показано, что форма адсорбированного кислорода соответствует  $O^-$ , независимо от температуры, из чего сделан вывод, что хемосорбция приводит к заполнению кислородных вакансий, согласно реакции:



Для дополнительного подтверждения наличия  $O^-$  и  $V^{4+}$  образцы  $InVO_4$  и  $BiVO_4$ -ms были исследованы методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Анализу подверглись исходные образцы, а также образцы, отожженные в аргоне при температуре 300 °С в течение суток. Отжиг в инертной среде привёл к увеличению концентрации  $O^-$  и  $V^{4+}$ , которые наблюдаются в структуре  $InVO_4$  и согласуются с представленной выше реакцией.

Для  $BiVO_4$  преобладающая форма адсорбированного кислорода меняется от молекулярной  $O_2^-$  до атомарной  $O^-$  с ростом температуры, что согласуется с литературной моделью хемосорбции  $O_2$  на полупроводниковых оксидах [4]. По данным ЭПР, для  $BiVO_4$  наблюдается два различных типа кислородных вакансий, одни из которых соответствуют F-центрам, а другие – катионам  $V^{4+}$ . Наличие различных типов вакансий объясняет двойственное поведение  $BiVO_4$ : с одной стороны, взаимодействие с газами-восстановителями осуществляется благодаря решеточному кислороду, с другой стороны,  $BiVO_4$  подчиняется классической модели хемосорбции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-73-10038.

#### Библиографический список

1. Tricoli A., Righettoni M., Teleki A. // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2010. – T. 49. – №. 42. – C. 7632-7659.
2. Nikolic M. V. et al. // *Sensors*. – 2020. – T. 20. – №. 22. – C. 6694.
3. Zhang D. et al. // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2020. – T. 413. – C. 213272.
4. Barsan N., Weimar U.D.O. // *Journal of electroceramics*. – 2001. – T. 7. – C. 143-167.

# ТРАНСЭНЕРГОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

**О.А. Молоканова (Москалюк)<sup>1,2\*</sup>, Е.С. Цобкалло<sup>2</sup>,  
Г.П. Мещерякова<sup>2</sup>, Г.О. Молоканов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

*\*omoskaluk1@kantiana.ru*

Создание полимерных композиционных материалов с заданным набором эксплуатационных свойств на основе полимерных композитов является одним из приоритетных направлений в науке и позволяет решить актуальные задачи в различных отраслях промышленности. Разработка материаловедческих основ получения таких материалов позволяет значительно разнообразить свойства полимеров, а применение математических инструментов позволяет ускорить процесс разработки новых изделий [1-4].

Композиционные полимерные материалы по функциональному признаку можно разделить на конструкционные материалы, т.е. полимерные материала с улучшенными механическими свойствами (прочностью, модулем жёсткости, ползучестью, релаксационными и другими свойствами), и материалы со специальными физическими свойствами (тепловыми, оптическими, электрофизическими и другими). Полимерные материалы в большинстве своём являются диэлектриками и обладают низким коэффициентом теплопроводности, поэтому именно эти свойства следует соотносить в сравнении с характеристиками полимерных композитов. В таблице 1 приведены основные физические характеристики полимерных материалов.

Таблица 1. Основные характеристики физических свойств полимерных диэлектриков

Свойство	Характеристика	Обозначение, размерность
Поляризация	Относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$
Электропроводность	Удельное объёмное электрическое сопротивление, Удельное поверхностное электрическое сопротивление	$\rho_v$ , Ом·м $\rho_s$ , Ом
Электрические потери	Тангенс угла диэлектрических потерь	$\operatorname{tg}\delta$
Электрическая прочность	Пробивная напряженность	$E_{\text{пр}}$ , МВ/м, кВ/мм
Теплопроводность	Коэффициент теплопроводности	$\lambda$ , Вт/(м·К)

Важным классом полимерных композиционных материалов являются материалы типа «проводник – диэлектрик», которые содержат компоненты с резко различающимися электропроводностью и теплопроводностью. В таких матери-

алах в качестве диэлектрика выступает полимерная матрица (чаще всего термопластичная), а в качестве дисперсного наполнителя – технический углерод, графит, металлы, а также, углеродные наночастицы – нановолокна и нанотрубки. Создание таких композиционных материалов позволяет существенно повышать значение их электро- и теплопроводности и обеспечивает изготовление конечных изделий в виде объемных, плёночных и волокнистых структур. Класс таких полимерных композиционных материалов получил название – трансэнергопластики (ТРПК). Которые в зависимости от природы могут проводить/отводить электрическую или тепловую энергию. Основной сферой применения ТРПК с теплопроводящими свойствами является изготовление так называемых термоинтерфейсов — изделий, обеспечивающих передачу тепла непосредственно от теплогенерирующих устройств в окружающую среду. Электропроводящие ТРПК в зависимости от уровня электропроводности находят применение при производстве антистатических/электрорассеивающих материалов, сенсоров, датчиков и экранирующих ЭМИ материалов.

Цель данной работы состояла в разработке композитных материалов на основе полиолефиновой и полиамидной термопластичных матриц, наполненных высокодисперсными углеродными наполнителями различной геометрической формы (сферические и протяженные частицы) с заданным уровнем тепло- и электропроводности, и моделировании перколяционных процессов электропроводности в этих материалах.

По расплавной технологии были получены образцы композиционных материалов на основе термопластичной полипропиленовой и полиамидной матриц и высокодисперсных углеродных наполнителей в виде изотропных и анизотропных частиц.

На основании полученных экспериментальных исследований показано, что изменение значений электрического сопротивления от концентрации наполнителей носит пороговый (перколяционный) характер. Показано, что все использованные углеродные наполнители позволяют получить композиционный материал для использования его в электротехнических приложениях. При этом введение высокодисперсных углеродных частиц с более высоким осевым отношением позволяет сдвинуть порог протекания в сторону меньших концентраций наполнителя. Концентрационные зависимости теплопроводности при этом имеют линейный характер. Введение анизотропных углеродных частиц позволяет создавать полимерные композиты, подходящие для создания термоинтерфейсов, обеспечивающих эффективный теплоотвод с электронных компонентов.

На основе экспериментальных данных построены математические модели зависимости удельного объемного электрического сопротивления полимерных композитов от вида наполнителя, полимерной матрицы, концентрации углеродных частиц и технологии изготовления. С помощью построенной модели вычислены важнейшие параметры перколяционного процесса, протекающего

полимерных композитах, наполненных изотропными и анизотропными углеродными частицами, и вычислено, какие электропроводящие свойства получают разработанные ТРПК.

#### Библиографический список

1. Шевченко В.Г. // МГУ, 2010. 99 с.
2. Блайт Э.Р., Блуд Д. // ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
3. Kopotilova A.A., Pimenov V.I., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A., Martsenyuk V.V. // Fibre Chemistry. 2024. T. 56. № 2. C. 128-131.
4. Meshcheryakova G.P., Tsobkallo E.S., Vol'nova D.V., Moskalyuk O.A. // Fibre Chemistry. 2024. T. 56. № 3. C. 234-239.

## ГИБРИДНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО WSe<sub>2</sub> И УПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛАЗМОННЫХ ЗОЛОТЫХ НАНОБАМПОВ

А.В. Николаева<sup>1,2\*</sup>, М.А. Аникина<sup>1,2</sup>, А.А. Кучмижак<sup>3</sup>,  
В.М. Кондратьев<sup>1,2</sup>, В.А. Шаров<sup>1,4</sup>,  
Е.Ю. Барулина<sup>5,6</sup>, А.Д. Большаков<sup>1,2,7</sup>

<sup>1</sup> СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия;

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия;

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>5</sup> Российский квантовый центр, Территория Инновационного центра “Сколково”,  
Москва, Россия;

<sup>6</sup> Московский центр перспективных исследований, Москва, Россия;

<sup>7</sup> Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

\*nikalex2000@bk.ru

Двумерные материалы, демонстрирующие уникальные оптические, механические и электронные свойства, в настоящее время привлекают значительное внимание в контексте развития нанофотоники [1]. Среди двумерных материалов особо стоит выделить класс дихалькогенидов переходных металлов, широко изученные представители которого (MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub>) известны своим переходом из непрямозонных в прямозонные полупроводники в своей двумерной форме, большими энергиями связи экситонов [2], сильным взаимодействием света и вещества [3] и электрически перестраиваемыми экситонными свойствами [4]. Среди семейства данных материалов, диселенид вольфрама (WSe<sub>2</sub>) обладает выдающимися люминесцентными характеристиками, что

делает его перспективным кандидатом для применения в оптоэлектронных устройствах нового поколения. В настоящей работе исследуется гибридная система, формируемая путем интеграции  $WSe_2$  с плазмонными наноструктурированными поверхностями. Предполагается, что взаимодействие между экситонами в двумерном слое дихалькогенида переходного металла и локальными плазмон-поляритонами приведет к усилению оптических свойств материала за счет взаимодействия плазмонного резонанса и экситонных переходов  $WSe_2$ . Дополнительное усиление фотолюминесценции может быть достигнуто за счет деформации монослоя  $WSe_2$ , возникающей при его нанесении на наноструктурированную поверхность. Деформация двумерного материала приводит к изменению ширины запрещенной зоны и энергии экситонных переходов, что, в свою очередь, влияет на эффективность рекомбинации носителей заряда и интенсивность фотолюминесценции.

В нашей работе монослои  $WSe_2$  получены с помощью метода механической эксфолиации и перенесены на целевую подложку с золотыми нанобампами, полученными методом прямой фемтосекундной лазерной печати.

Оптические свойства такой структуры были охарактеризованы с помощью микроспектроскопии комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции. Измерения проводились на спектрометре Horiba LabRAM HR 800. Источником возбуждающего излучения служил твердотельный лазер 532 нм с диодной насадкой. Спектры ФЛ показали, что интенсивность отклика от монослоя  $WSe_2$ , лежащего на нанобампах, в диапазоне длин волн 720-780 нм с пиком на 750 нм превысила интенсивность сигнала от монослоя  $WSe_2$  лежащего на плоской золотой поверхности подложки в 2 раза, что можно объяснить эффективным взаимодействием монослоя  $WSe_2$  с плазмонными поверхностными наноструктурами (рис.1).

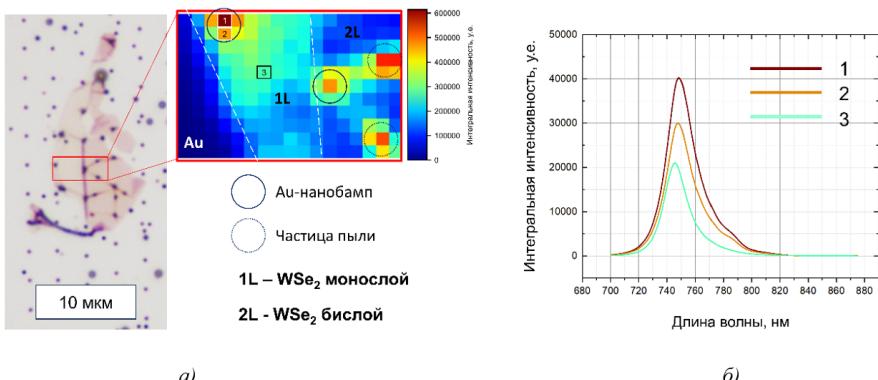


Рис. 1. Карта интегральной интенсивности фотолюминесценции  $WSe_2$  на золотых нанобампах (а) и спектр фотолюминесценции  $WSe_2$  в области 1, 2, 3 (б)

Новизна и практическая значимость представленного исследования обусловлена применением нанобампов, формирование которых осуществляется посредством простого и эффективного метода, альтернативного традиционным процессам литографии и травления. Нанобампы представляют собой конусообразные наноструктуры, создаваемые путем лазерного структурирования тонкой золотой пленки. Параметры лазерного излучения позволяют контролировать геометрию структур и период решетки, что обеспечивает возможность прецизионного контроля над оптическими характеристиками гибридной структуры.

А.В.Н. и М.А.А. выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение 075-03-2023-106 от 13.01.2023, проект FSMG-2021-0005) за поддержку в анализе экспериментальных данных. А.Д.Б. благодарит Российский научный фонд (Грант 24-12-00225) за поддержку в проведении исследования.

#### **Библиографический список**

1. *Kuznetsov A. [et al.]. In-Plane Directional MoS2 Emitter Employing Dielectric Nanowire Cavity //Small Structures. 2025. P. 2400476.*
2. *Ermolaev G. A. [et al.]. Broadband optical properties of monolayer and bulk MoS2 //npj 2D Materials and Applications. 2020. V. 4. P. 21.*
3. *Splendiani A. [et al.]. Emerging photoluminescence in monolayer MoS2 //Nano letters. 2010. V. 10. P. 1271-1275.*
4. *Chernikov A. [et al.]. Electrical tuning of exciton binding energies in monolayer WS2 //Physical review letters. 2015. V. 115. P. 126802.*

## **АНАЛИЗ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

**А.А. Образцова\*, И.С. Махов, И.А. Мельниченко, К.А. Иванов, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков**

*Международная лаборатория квантовой оптоэлектроники,  
НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург, Россия,  
\*aobraztsova@hse.ru*

Микродисковые лазеры с квантовыми точками (КТ) благодаря своим компактным размерам, высокой добротности поддерживаемых мод шепчущей галереи (МШГ) и возможности достижения низкотороговой 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 распре-

деление 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 в плоскости резонатора, что может быть использовано для селекции МШГ, а также для спектрального переключения линии генерации микролазера.

В настоящей работе впервые исследованы спектры лазерной генерации микрорезонаторов с КТ InAs/InGaAs при пространственно-неоднородном оптическом возбуждении. На примере микрорезонатора диаметром 10 мкм изучено влияние положения пятна накачки на спектры лазерной генерации. Были проведены измерения пространственного распределения интенсивности излучения доминирующих лазерных МШГ мод микрорезонатора. Обнаружено, что в зависимости от радиального положения пятна оптического возбуждения наблюдается спектральное переключение линии генерации микрорезонаторного 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 (рис. 1). При этом обнаруженное спектральное переключение не приводит к заметному изменению порога лазерной генерации.

Азимутальный ( $m$ ) и радиальные ( $q$ ) порядки МШГ, участвующих в генерации, были определены с помощью теоретического расчета модового состава излучения микрорезонатора. Кроме того, с помощью ближнепольной оптической микроскопии были получены картины распределения интенсивности поля МШГ, подтверждающие теоретический результат (рис. 2а, б).

Кроме того, был проведен аналитический анализ распределения концентрации возбужденных носителей заряда в активной области при различных диаметрах пятна накачки и определена длина диффузии неравновесных носителей для активной области КТ, которая составляет  $1,5 \pm 0,5$  мкм, что хорошо согласуется с литературными данными.

Таким образом, впервые было достигнуто обратимое и воспроизводимое переключение длины волны излучения путем изменения радиального порядка моды при неоднородном возбуждении КТ микрорезонатора. Длина волны лазерной генерации микрорезонаторного лазера может быть изменена примерно на 28 нм путем перемещения области пространственного возбуждения на расстояние всего в несколько микрометров. В этом случае обе МШГ соответствуют основному оптическому переходу КТ (с длиной волны, близкой к 1.3 мкм), и для обеих МШГ были найдены сопоставимые пороговые плотности мощности. Кроме того, была аналитически определена диффузионная длина как  $1,5 \pm 0,5$  мкм для активной области КТ, что согласуется с литературными данными.

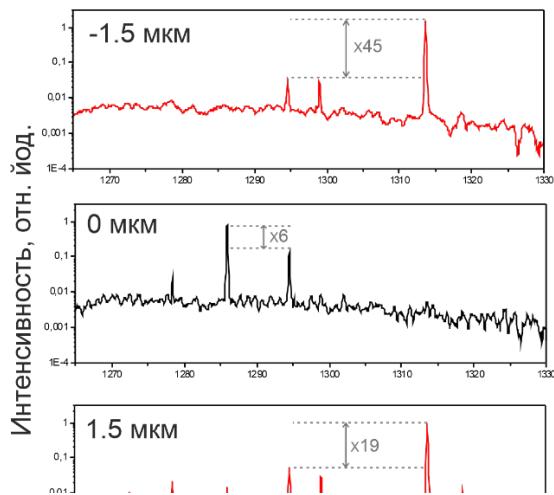


Рис. 1. Спектры генерации микродискового лазера диаметром 10 мкм, измеренные при различных координатах пятна накачки. Оптическая плотность мощности возбуждения составляет 100 кВт/см<sup>2</sup>.

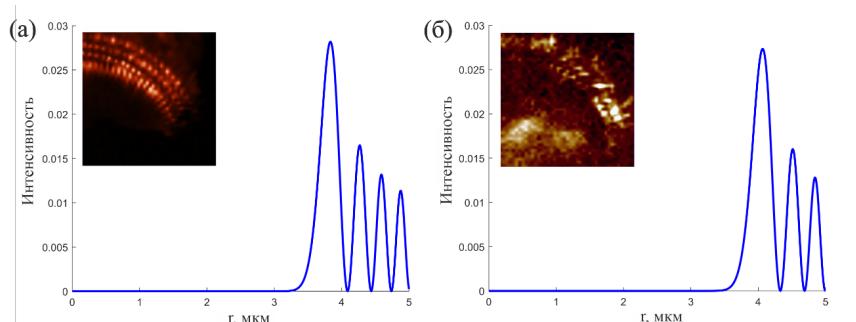


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля микродискового лазера с КТ с диаметром резонатора 10 мкм. Теоретические результаты и результаты спектроскопии ближнего поля (вставки): (а) излучение на длине волны 1285 нм, соответствующее МШГ с  $q=4$ ,  $m=63$ , (б) излучение на длине волны 1313 нм, соответствующее МШГ с  $q=3$ ,  $m=66$ .

Исследования выполнялись при поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

#### Библиографический список

1. He L, Özdemir Ş.K., Yang L. // *Laser & Photonics Reviews*. 2013. Vol. 7(1). P. 60.
2. Ilchenko V.S., Matsko A.B. // *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*. 2006. Vol. 12(1). P. 15.
3. Bogdanov A.A. et al. // *Optics Letters*. 2015. Vol. 40(17). P. 4022.

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РОСТА СИЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ $In(x>0.35)GaAs$ НА ВРЕМЯ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Д.С. Папылев<sup>1\*</sup>, А.В. Бабичев<sup>1</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1</sup>,  
Л.Я. Каачинский<sup>1</sup>, В.В. Андрюшкин<sup>1</sup>, И.И. Новиков<sup>1</sup>,  
А.О. Ефимов<sup>1</sup>, А.Ю. Егоров<sup>1</sup>, А.М. Надточий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО,

Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

Санкт-Петербург, Россия

*\*dspapylev@itmo.ru*

Высокоэффективные монолитные вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) оптического диапазона 1200-1300 нм на подложке GaAs востребованы в современной сенсорике и могут быть изготовлены с использованием сильно напряженных квантовых ям (КЯ) InGaAs с долей арсенида индия, достигающей 40% [1]. Однако, вследствие значительного рассогласования постоянных решеток  $In_{0.4}Ga_{0.6}As$  и GaAs, рост высоконапряженных КЯ может быть сопряжен с ухудшением структурного качества слоя квантовой ямы InGaAs. Повышенная плотность структурных дефектов сопутствует увеличению темпа безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли-Рида-Хола, которое, в итоге, приводит к снижению энергоэффективности лазера. Исходя из этого для достижения высокого структурного качества сильно напряженного слоя требуется подобрать параметры роста, в частности скорость осаждения InGaAs, таким образом, чтобы повысить эффективность фотолюминисценции квантовой ямы InGaAs. В настоящей работе ставится задача исследования влияния параметров эпитаксиального роста на время безызлучательной рекомбинации в КЯ InGaAs.

В рамках настоящей работы методом молекулярно-пучковой эпитаксии были выращены 4 гетероструктуры, содержащие КЯ  $In_{0.4}Ga_{0.6}As$  толщиной 7 нм с барьерами GaAs. Слой InGaAs выращивался в гетероструктурах при температуре подложки 520 °C и соотношении потоков материалов III и V групп 1/10, соответственно, с использованием различных скоростей роста. Фактический состав и толщина КЯ были определены методом рентгеновской дифрактометрии. Результаты определения состава и толщины КЯ, а также скорости роста КЯ для образцов представлены в таблице 1. Для оценки параметров рекомбинации носителей заряда гетероструктуры были измерены методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) в температурном диапазоне 20-325 °C. В целях определения времени безызлучательной рекомбинации в КЯ зависимости интегральной интенсивности ФЛ сравнивались с расчетными значениями токов излучательной рекомбинации в КЯ в соответствии с выражениями [2].

	Скорость роста, Å/с	Содержание InAs, %	Толщина КЯ, нм
1	0,9	36,9	8,0
2	2,5	38,2	7,6
3a	3,3	38,5	7,2
3b	3,3	40,6	7,8

Таблица 1 -Скорости роста и измеренные параметры КЯ

При анализе зависимости интегральной интенсивности от температуры было показано, что интенсивность образцов ФЛ у образцов 1 и 2, выращенных с малой скоростью роста, падает с ростом температуры стремительнее чем у образцов 3a и 3b с увеличенной скоростью роста КЯ. По результатам расчетов время безызлучательной рекомбинации в КЯ при комнатной температуре составило  $\sim 1 \cdot 10^{-8}$  с для образцов 3a и 3b. Аналогичный параметр для образцов 1 и 2 с пониженной скоростью роста КЯ составил  $\sim 1 \cdot 10^{-9}$  с.

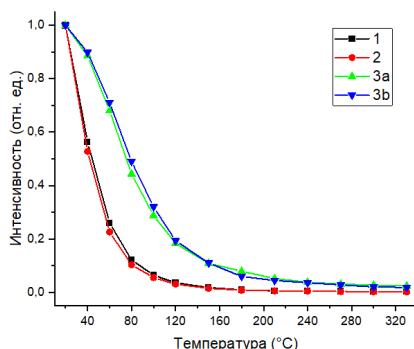


Рис. 1 – Измеренные зависимости интегральной ФЛ (справа) от температуры

Результаты, полученные рентгенодифракционным методом для образцов с малой скоростью роста, демонстрируют недостаток мольной доли InAs в твердом растворе InGaAs при увеличении толщины КЯ. Подобное явление может быть вызвано увеличением времени экспозиции поверхности при росте КЯ, что приводит к переиспарению атомов In с поверхности слоя InGaAs. Достигнутые более высокие концентрации InAs в образцах 3a и 3b в совокупности с увеличенной интегральной ФЛ позволяют утверждать, что сильно напряженные слои InGaAs с повышенной до 3,3 Å/с скоростью роста характеризуются лучшим структурным качеством относительно слоев, выращенных при меньших скоростях роста.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0005). А.М. Надточий благодарит Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ за поддержку работы.

#### Библиографический список

1. Sundgren, Petrus, et al. // Electronics Letters. 2003. V. 39(15) P. 1128.
2. Asryan L. V., Suris R. A. // Semiconductor Science and Technology. 2012. V. 11(4). P. 554

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

М.И. Пауков <sup>1\*</sup>, С. Коларь <sup>1, 2</sup>, К. А. Брёхов <sup>2, 4</sup>, Д. В. Красников <sup>3</sup>,  
Г. А. Командин <sup>5</sup>, А. И. Чернов <sup>1, 2</sup>, К. И. Зайцев <sup>5</sup>, А. Г. Насибулин <sup>3</sup>,  
М. Г. Бурданова <sup>1, 5, 6</sup>

<sup>1</sup> Центр фотоники и двумерных материалов МФТИ, Долгопрудный, Россия;

<sup>2</sup> Российский квантовый центр, Москва, Россия;

<sup>3</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;

<sup>4</sup> Российский технологический университет МИРЭА (РТУ МИРЭА), Москва,  
Россия;

<sup>5</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия;

<sup>6</sup> Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Россия

<sup>\*</sup>paukov.mi@phystech.edu

С развитием источников и детекторов терагерцевого (ТГц) излучения стали актуальны оптические элементы для этого диапазона, поскольку они позволяют управлять излучением для конкретных приложений [1]. Функционирование этих элементов во многом определяется диэлектрическим откликом в субмиллиметровом диапазоне для материалов, на основе которых они созданы. Оптоэлектронные свойства материала определяются его структурой, и на них может оказывать существенное влияние наличие дефектов - как положительное, так и отрицательное.

В данной работе изучалось влияние кислородных дефектов на проводимость углеродных нанотрубок в сильных и слабых переменных электрических полях ТГц частот, а также на динамическую фотопроводимость в ТГц диапазоне частот. Технология изготовления изучаемых одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в виде плёнок описана в [2]. Для создания разного количества дефектов в плёнках ОУНТ использовалось плазменное травление в течение разного количества времени: 10, 30, 60, 90 с. Присутствие дефектов было определено по увеличению отношения интенсивностей G и D-мод в спектрах комбинационного рассеяния, а также по изменению положения переходов между сингулярностями ван Хова в спектре поглощения.

Влияние количества дефектов прослеживается в спектрах динамической проводимости ТГц диапазона. Для описания данных была выбрана модель Друде-Лоренца, учитывающая вклады как свободных носителей заряда, так и их коллективные осцилляции на концах трубки, кроме того, учтена прыжковая проводимость. Изменение параметров в зависимости от числа дефектов находится в согласии с теорией рассеяния при транспорте заряда.

Анализ спектров проводимости при сильных мощностях терагерцевого пучка показывает, что образцы просветляются в ТГц диапазоне при увеличении

мощности пучка, и достигает насыщения. Для образцов с дефектами и без дефектов качественная зависимость одинакова, но значения различны.

Спектроскопия оптической накачки - ТГц зондирования показала, что релаксация свободных носителей заряда носит различный характер в зависимости от количества дефектов, что связано с созданием дополнительных дефектных уровней, через которые происходит релаксация. Спектры проводимости демонстрируют подавление фотовозбуждённого изменения с увеличением числа дефектов.

В качестве практического приложения было проведено моделирование работы поляризатора на основе решётки из полос ОУНТ с вариацией геометрии и количества дефектов. Данное моделирование включает в себя полученные зависимости диэлектрической функции на ТГц частотах. Данный поляризатор показывает высокую 98% селективность для выделения одной поляризации.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-79-00143.

#### **Библиографический список**

1. *Xu S.-T., Chen S., Mou L.-L., Fan F., Liu Z.-F., Chang S.-J. // Carbon. 2018. V. 139. P. 801–807.*
2. *Khabushev E.M., Krasnikov D.V., Kolodiaznaia J.V., Bubis A.V., Nasibulin A.G. // Carbon. 2020. V. 161. P. 712–717.*

## **ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОРЕЗИСТОРОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**А.А. Пятлин\*, Д.В. Морозов**

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

Санкт-Петербург, Россия

\*rossomaxa@cave3d.com

При разработке биомедицинского оборудования особое внимание уделяется обработке сигналов, поскольку важно выделить полезный сигнал на фоне различных помех и шумов для обеспечения точной диагностики и эффективного лечения. В данной работе мы представляем фильтр нижних частот на основе отрицательных конверторов импеданса и с использованием псевдорезисторов для применения в электронном стетоскопе. Как известно, основные пики звуков биения сердца и легких находятся в диапазоне до 1 кГц, а входной сигнал имеет амплитуду 35-50 мВ [1]. Также фильтр для электронного стетоскопа должен обладать малой неравномерностью в полосе пропускания и резким спадом в полосе перехода для эффективного пропускания полезного сигнала и подавления помех вне указанного диапазона. Поэтому выбран фильтр, реализующий аппроксимацию Золотарева и имеющий частоту среза 1 кГц. Для разработки

устройства была выбрана отечественная технология Micron 180 nm.

Поскольку электронный стетоскоп является переносимым устройством, необходимо минимизировать вес и размеры микросхемы. Для этого катушки индуктивности, занимающие большую площадь на кристалле, заменяются отрицательными конверторами импеданса. Затем уменьшаются номиналы и соответственно площадь конденсаторов. В результате наибольшую площадь в получившейся схеме занимают резисторы, значения сопротивлений которых достигают сотен МОм. Обеспечить такое большое сопротивление с уменьшением занимаемой площади позволяют псевдорезисторы. Псевдорезистор представляет из себя особую схему включения одного-двух МОП-транзисторов, находящихся в области слабой инверсии. Благодаря этому псевдорезисторы могут иметь линейной сопротивление вплоть до ГОм, задаваемое управляющим напряжением на затворе транзисторов. Однако в данной работе в качестве управляющего напряжения выбрана половина напряжения питания для всех псевдорезисторов, для того чтобы не создавать дополнительные источники питания и не повышать потребляемую мощность устройства. Поэтому величина сопротивления регулируется длиной и шириной МОП-транзисторов и последовательным включением нескольких ячеек псевдорезисторов.

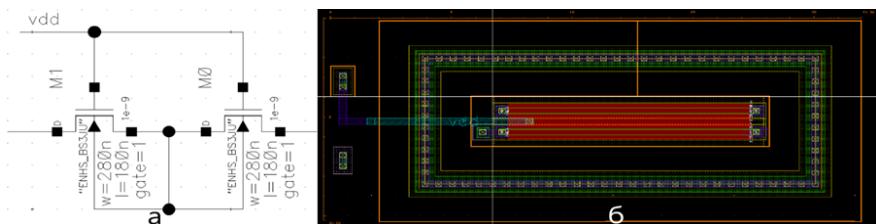
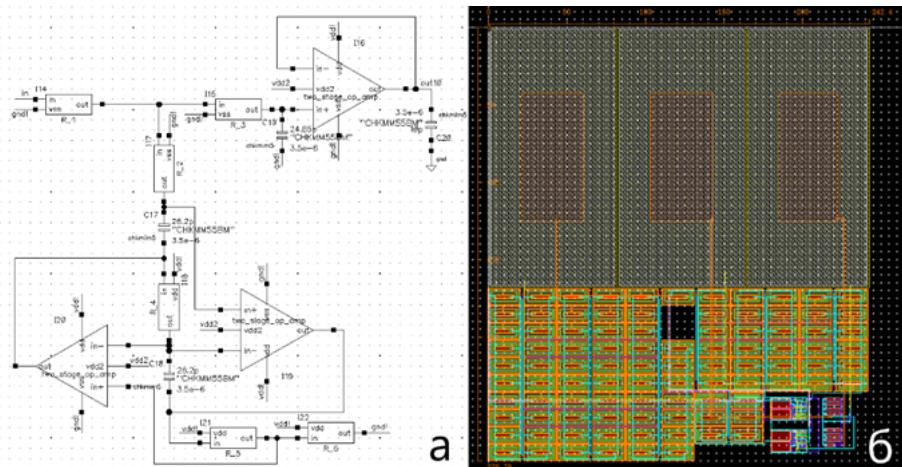


Рис. 1. Схема (а) и топология (б) ячейки псевдорезистора на основе *n*-транзисторов

На рис. 1 представлены схема (рис. 1, а) и топология (рис. 1, б) ячейки псевдорезистора на основе *n*-транзисторов. На рис. 2 приведены схема (рис. 2, а) и топология (рис. 2, б) разработанного фильтра нижних частот. Общее сопротивление всех резисторов схемы составляет 250 МОм, а площадь, занимаемая резисторами  $1,6 \times 10^6$  мкм<sup>2</sup>. После замены их на псевдорезисторы, площадь, занимаемая псевдорезисторами стала  $2,3 \times 10^4$  мкм<sup>2</sup>, что позволило уменьшить площадь сопротивления примерно в 70 раз, при этом площадь всего фильтра равна  $6,7 \times 10^4$  мкм<sup>2</sup>. Затем была получена амплитудно-частотная характеристика фильтра. Частота среза фильтра составляет 1 кГц, а неравномерность в полосе пропускания 0,9 дБ. Частота подавления составляет 10 кГц, а подавление в полосе задерживания более 76 дБ. При этом нелинейные искажения в полосе пропускания составляют не более 50 дБ при рабочей амплитуде сигнала 50 мВ. Далее был проведен анализ работоспособности фильтра при разных температурных условиях (-40, 27 и 85 °C) и отклонении размеров элементов от заданных. Уход частоты среза в наихудших случаях составляет не более 500 Гц, а

неравномерность в полосе пропускания изменяется максимум на 2 дБ. То есть фильтр показывает хорошую работоспособность при разбросе параметров, так как основные пики звуков биения сердца и легких лежат в диапазоне до 500 Гц, а электронный стетоскоп не планируется использовать при значениях температур, далеких от комфортных для жизни человека.



# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ФРЕНЕЛЕВСКАЯ ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СИСТЕМ

А.В. Радивон<sup>1\*</sup>, Н.И. Рагинов<sup>4</sup>, Г.М. Катыба<sup>2,3</sup>, А.А. Мкртчян<sup>4</sup>,  
А.В. Черных<sup>5</sup>, И.И. Раков<sup>4</sup>, М.И. Пауков<sup>1</sup>, М.С. Миронов<sup>1</sup>, М.А.  
Шашков<sup>1</sup>, Г.А. Командин<sup>2</sup>, К.И. Зайцев<sup>2</sup>, Ю.Г. Гладуш<sup>4</sup>, Н.В.  
Петров<sup>5,6</sup>, А.Г. Насибуллин<sup>4</sup>, А.В. Арсенин<sup>1</sup>,  
Д.В. Красников<sup>4</sup>, М.Г. Бурданова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия;*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия;*

<sup>3</sup>*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия;*

<sup>4</sup>*Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;*

<sup>5</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;*

<sup>6</sup>*Харбинский инженерный университет, Харбин, Китай*

\*radivon.av@phystech.edu

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот (0.1–10 ТГц) является основой для современных технологий, включая системы безопасности, медицинскую диагностику и высокоскоростную связь [1]. Однако отсутствие компактных и перестраиваемых оптических компонентов остается основным ограничением для их широкого использования. В данной работе предложена электрохимически-управляемая зонная пластинка Френеля на основе пленок из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), сочетающая функции фокусировки и динамической модуляции ТГц-излучения.

Пленки ОУНТ, синтезированные методом ХОГФ [2], были нанесены в виде концентрических колец, необходимых для формирования зонной пластинки Френеля с фокусным расстоянием 2 см на частоте 327 ГГц. Конечное устройство состояла из колец ОУНТ и золотых противоконтактов, соединенных ионной жидкостью, и инкапсулированных в сэндвич-структуре из двух пластин кварца. Данная конфигурация позволяет реализовать электрохимическое додирование по двухконтактной схеме. Визуализация поля за оптическим элементом проводилась на установке, включающей лампу обратной волны в качестве источника ТГц излучения и трехкоординатного сканатора с закрепленным детектором в виде ячейки Голея.

В отсутствии напряжения зонная пластина Френеля работает как линза с фокусным расстоянием 2 см на 327 ГГц, что подтверждает возможность использования УНТ для подобных дифракционных элементов. Приложение разности потенциалов, от -2 до +2 В приводит к изменению амплитуды поля, с глубиной модуляции, т.е. относительным изменением сигнала, от -20% до +15%. При этом положение фокуса оставалось практически неизменным при тех же значениях разности потенциала.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования электрохимического додирования ОУНТ для создания адаптивных ТГц-устройств.

Основное ограничение заключается в сравнительно медленном времени переключения (около 3 минут), связанным с диффузионными процессами в ионной жидкости, подбор которой является дальнейшим направлением исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №24-79-00143.

#### Библиографический список

1. *Shafie A. et al. // IEEE Network. 2022. V. 37(3). P. 162-169.*
2. *Khabushev E. M. et al. // The journal of physical chemistry letters. 2019. V. 10(21). P. 6962-6966.*

## КОНСТРУКЦИИ СЕКТОРНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs/GaAs

**Романчук А.К.<sup>1\*</sup>, Малевская А.В.<sup>1</sup>, Калужный Н.А.<sup>1</sup>, Покровский П.В.<sup>1</sup>, Нахимович М.В.<sup>1</sup>, Шварц М.З.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*a.romanchuk@mail.ioffe.ru*

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ) представляют собой ключевой элемент систем беспроводной передачи энергии, обеспечивая прямое преобразование лазерного излучения в электричество с высоким КПД. Такие преобразователи находят применение в системах питания беспилотных аппаратов, космических технологиях, а также в системах, где требуется компактный и надежный источник энергии [1-3].

Секторные ФЭП с последовательным соединением субэлементов представляют значительный интерес для систем лазерного энергопитания благодаря своей способности обеспечивать высокое выходное напряжение в диапазоне 3-12 В (в зависимости от числа секторов) при минимальных омических потерях. В отличии от традиционных ФЭП, где увеличение тока приводит к квадратичному росту потерь, секторная конструкция ФЭП позволяет распределить ток между субэлементами снижая потери по закону  $(I_{sc}/n)^2R$ , где  $I_{sc}$  -ток короткого замыкания, n-число секторов, R-сопротивление [4].

Данное исследование посвящено разработке и оптимизации секторных ФЭП ЛИ длиной волны 850 nm основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs, выращенной на полуизолирующей подложке методом МОС-гидридной эпитаксии. Все образцы ФЭП изготовлены с использованием последовательности постростовых операций: формирование антиотражающего покрытия (АОП), напыление омических контактов, селективное травление слоев гетероструктуры и формирование мезы, разделяющей сектора ФЭП на отдельные элементы. Травление проводится с использованием жидкостного и плазмохимического

методов. Отдельное внимание уделялось формированию масок фоторезиста прямого профиля толщиной 5-15 мкм для получения мезы аналогичной ширины. Для оценки характеристик использовались методики, учитывающие равномерное освещение субэлементов и засветку изолированного сектора.

Были изготовлены ФЭП с шестью последовательно соединенными секторами (см. рис. 1), что позволило достичь выходного напряжения более 6 В (см. рис.2). Наличие мезы, разделяющей сектора ФЭП в пределах фоточувствительной области, ведет к возникновению фотоиндукционного шунта. Это обуславливает необходимость проведения исследований по уменьшению ширины мезы для снижения шунтирующих токов и оптических потерь.

Полученные результаты показывают перспективность применения разработанных секторных ФЭП в системах лазерного энергопитания при специальных (нестандартных) требованиях по напряжению со стороны конечного потребителя. Дальнейшие исследования будут направлены на снижение оптических и омических потерь с целью повышения эффективности ФЭП.

Рис. 1. – Секторный ФЭП (последовательное соединение субэлементов)

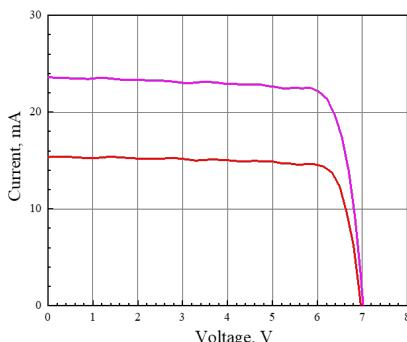
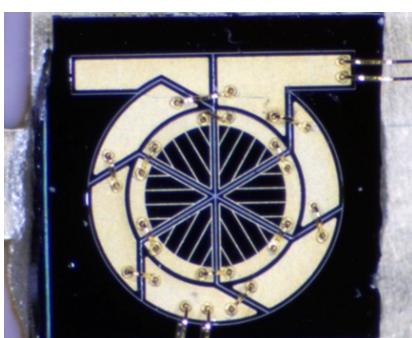


Рис. 2. – Вольтамперные характеристики секторных ФЭП  
Библиографический список

1. *Zheng Y. et al. Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges // Space Solar Power and Wireless Transmission. – 2024*
2. *L. Summerer and O. Purcell, Concepts for Wireless EnergyTransmission via Laser, European Space Agency, Paris,France, 2008*
3. *Kalyuzhnyy N.A., Malevskaya A.V., Mintairov S.A., Mintairov M.A., Nakhimovich M.V., Salii,RA; Shvarts,MZ; Andreev,VM, Photovoltaic AlGaAs/GaAs devices for conversion of high-power density laser (800–860 nm) radiation. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, v.262, 2023, ArtNo: #112551*
4. *Algora C. et al. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light // Joule. – 2022. – T. 6. – №. 2. – C. 340-368*

**СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НОВЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ С ЯКОРНЫМИ ГРУППАМИ НА ОСНОВЕ  
ТРИФЕНИЛАМИНА  
ДЛЯ ИНТЕРФЕЙСНЫХ СЛОЕВ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ  
УСТРОЙСТВ**

**Сухорукова П.К.<sup>1\*</sup>, Балакирев Д.О.<sup>1</sup>, Гостищев П.А.<sup>2</sup>,  
Е.А. Ильичева<sup>2</sup>, Саранин Д.С.<sup>2</sup>, Лупоносов Ю.Н<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова  
Российской академии наук, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва, Россия.*

*\*sukhorukova@ispmt.ru*

Среди всех развивающихся направлений органической фотовольтаики особое место занимает область перовскитных солнечных батарей (ПСБ), поскольку эти устройства способны достигать высоких (более 26% [1]) значений коэффициента полезного действия (КПД). Важным элементом ПСБ является наличие промежуточных слоев (дырочно-транспортных (ДТС) и электрон-транспортных (ЭТС)), которые обеспечивают хороший транспорт заряда, при этом снижаются потери энергии за счет создания плавного энергетического перехода между активным слоем и электродом. Часто ДТС модифицируют при помощи специальных органических материалов, создавая интерфейсный слой (ИС), который выполняет важную функцию увеличения стабильности всего устройства за счет эффективного подавления подвижности ионных дефектов и снижения концентрации ловушек [2]. Тем не менее, для увеличения КПД устройства при формировании активного слоя перовскита, как было обнаружено в работе [3], нужно использовать более гидрофобные материалы в качестве ИС. Таким образом, важной задачей для исследователей является создание новых, более гидрофобных материалов для формирования ИС в ПСБ.

В ходе данной работы был проведен синтез пяти полупроводниковых материалов, различающихся заместителями при трифениламиновом фрагменте. В качестве «якорной» группы для образования потенциально лучшей контактной поверхности с материалом электрода использовалась карбоксильная группа, сопряженная с трифениламиновым фрагментом через спейсерный тиофеновый мостик. Изучено влияние введения заместителей в структуру соединения на гидрофобность получающегося материала. Изучены оптические, термические и электрохимические свойства молекул. Два соединения, ТРАТС и F-ТРАТС на основе незамещенного трифениламина и замещенного двумя атомами фтора трифениламина, обладающих подходящим уровнем ВЗМО и дырочной подвижностью, были протестированы в качестве интерфейсного материала в перов-

скитных солнечных батареях, которые в случае **ТРАТС** показали хорошие значения КПД - 20.3% и модулях площадью 65 см<sup>2</sup>, а так же хорошую стабильность (в течение 1000 часов потери в эффективности не превышали 5%). В случае **F-ТРАТС** впервые была применена стратегия пассивации обеих сторон перовскитного материала, как со стороны ДТС, так и со стороны ЭТС, что позволило значительно повысить стабильность устройств как в обычном режиме работы, так и в режиме термического стресса.

*Авторы благодарят финансовую поддержку Российского научного фонда в рамках выполнения гранта №22-19-00812.*

#### **Библиографический список**

1. “National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page | NREL.”
2. *Sukhorukova P. K. et al. Triphenylamine-based interlayer with carboxyl anchoring group for tuning of charge collection interface in stabilized pin perovskite solar cells and modules //arXiv preprint arXiv:2311.13685. – 2023.*
3. *Abzieher T. et al. From Groundwork to Efficient Solar Cells: On the Importance of the Substrate Material in Co-Evaporated Perovskite Solar Cells //Advanced Functional Materials. – 2021. – Т. 31. – №. 42. – С. 2104482.*

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХИРАЛЬНЫХ КВАЗИ-2Д ПЕРОВСКИТОВ**

**Ю.А. Тимкина<sup>1\*</sup>, И.А. Алейник, Е.В. Ушакова<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Городской Университет Гонконга, Гонконг, Китай

*\* yu.a.timkina@itmo.ru*

Циркулярно-поляризованное излучение (ЦПИ) представляет собой вид эллиптически поляризованного излучения, в котором вектор электрического поля вращается в перпендикулярной направлению распространения плоскости с постоянной угловой скоростью. Для регистрации ЦПИ и различия его левой (L-ЦПИ) и правой (R-ЦПИ) составляющих, как правило, используются ахиральные полупроводниковые фотодетекторы (например, на основе Si или InGaAs) в сочетании с четвертьволновыми пластинами и линейными поляризаторами [1]. Такая архитектура обеспечивает непрямое детектирование ЦПИ, однако масштабирование подобных систем технически затруднено и требует значительных финансовых затрат. Одним из вариантов решения данной задачи является использование фотодетекторов с прямым обнаружением, где в качестве фотоактивного обнаружительного слоя используются хиальные перовскиты, так как фотодетекторы на основе перовскитов обладают низкими значениями шумового тока, высокой обнаружительной способностью. Благодаря своей кристаллической структуре перовскиты можно гибко настраивать и придавать им свойства, в том числе и хиальные [2].

В данной работе были исследованы зависимости хиральных, оптических свойств и энергетической структуры электронных состояний перовскита от типа хиральной молекулы, встраиваемой в кристаллическую решетку перовскита как пространственный катион, так и катион A. Также исследованы свойства полученных материалов от соотношения ахирального катиона A, представленного метиламмонием иодидом (MAI) и хиральных солей, представленных такими солями как S-метилбензиламин бромид (S-MBABr), S-метилбензиламин иодид (S-MBAI), S-(4-бромфенил)этанамин бромид (S-BPEABr), S-(4-бромфенил)этанамин иодид (S-BPEAI).

Пленки перовскита формировались с помощью метода центрифугирования (spin-coating). Растворы для нанесения подготавливались следующим образом: MAI, хиральные соли: S-MBABr, S-MBAI, S-BPEABr и S-BPEAI и иодид свинца ( $PbI_2$ ) смешивались в 150 мкл диметилсульфоксида. Молярное соотношение суммы количества MAI и хиральной соли к  $PbI_2$  составляло 3:2. В ходе синтеза менялось молярное соотношение MAI к хиральным солям с шагом 0,5 моль. Полученные растворы перемешивались в течение часа при температуре 60 градусов. Затем раствор фильтровался через PTFE фильтр с размерами пор 0,22 мкм. Подготовленный раствор наносился на стеклянную подложку и раскручивался на скорости 5000 об/мин с ускорением 1000 об/мин в течение 40 секунд. На 15 секунде центрифугирования на подложку быстро вводился хлорбензол, выступающий в качестве антирастворителя. После окончания центрифугирования подложки отжигались в течение 10 минут при 100°C.

Увеличение содержания хиральных солей в составе перовскита приводит к усилению сигналов кругового диахроизма. Наибольшие значения факторов диссимметрии наблюдаются при соотношении MAI:S-MBAI = 0:3 и составляют  $5,1 \cdot 10^{-4}$  на длине волны 500 нм и  $1,8 \cdot 10^{-3}$  на 382 нм. Для перовскитов с S-MBABr максимальные значения равны  $1,1 \cdot 10^{-4}$  при 485 нм и  $2 \cdot 10^{-4}$  при 372 нм. Составы с S-BPEABr и S-BPEAI имеют значения до  $3,2 \cdot 10^{-4}$  (368 нм) и  $2,2 \cdot 10^{-4}$  (495 нм) соответственно.

Изменение ширины запрещённой зоны оценивалось по методу Тауца. Для систем с бромсодержащими лигандами ширина зоны возрастает линейно при увеличении доли лиганда: от 1,54 до 1,76 эВ для S-MBABr и от 1,54 до 1,75 эВ для S-BPEABr. Для перовскитов на основе S-MBAI и S-BPEAI изменения ширины зоны минимальны и составляют 1,52–1,55 эВ. Для перовскитов, имеющих молярное соотношение MAI к хиральному лиганду, равным 1:2 были определены положения валентной зоны и построены энергетические диаграммы (рис. 1). Глубже всего валентная зона расположена у перовскита с S-MBABr ( $-5,97$  эВ) и S-BPEABr ( $-5,96$  эВ), в то время как с S-MBAI и S-BPEAI она сдвинута вверх до  $-5,39$  и  $-5,84$  эВ соответственно. Это может говорить о влиянии брома в составе молекулы на энергетическую структуру полученных перовскитов.

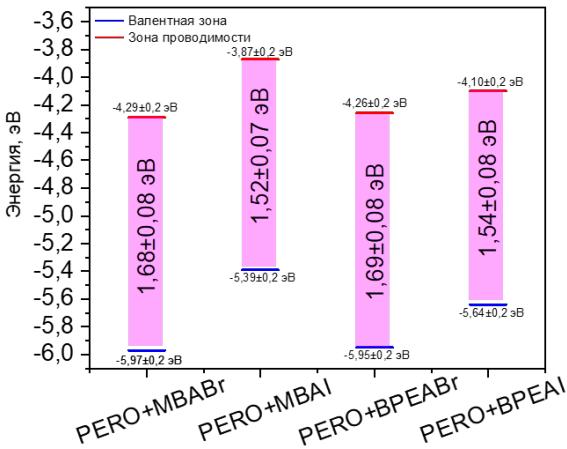


Рисунок 1 – Энергетические диаграммы полученных пленок перовскитов с соотношением  $MAI$  к хиральному лиганду как 1 к 2

Благодарности: работа выполнена при поддержке проекта НИОКР №425044 Университета ИТМО.

#### Библиографический список

1. *I. Rodríguez-Fortuño F.J., Barber-Sanz I., Puerto D. et al. // ACS Photonics. 2014. V. 1. P. 762–767*
2. *Zhao Y., Yin X., Gu Z. et al. // Adv. Funct. Mater. 2023. V. 33. N. 50.*

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СКРИНИНГА 3D-СФЕРОИДОВ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК

М.А. Трофимов<sup>12\*</sup>, В.С. Лавриненко<sup>1</sup>, В.Е. Попов<sup>1</sup>, С.Ф. Тяжельников<sup>1</sup>, А.С. Букатин<sup>1</sup>

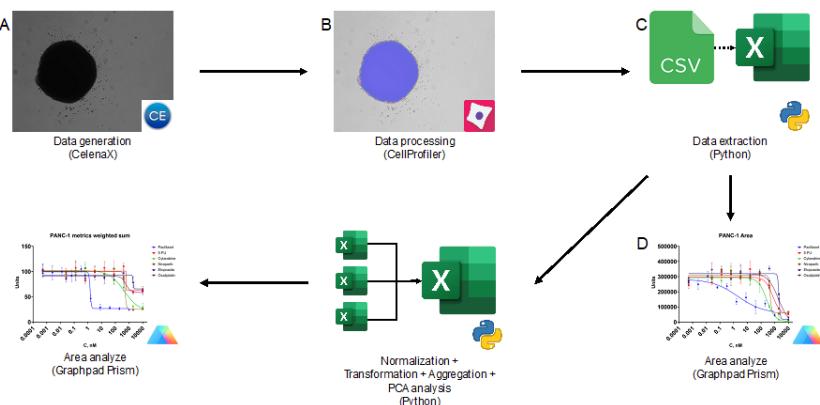
<sup>1</sup> АО «БИОКАД», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

\*mih.andr.trofimov@gmail.com

Для повышения достоверности доклинических исследований противоопухолевых препаратов в последние годы активно применяются трёхмерные (3D) модели опухолей в формате сфероидов [1,2]. Тем не менее, ограничениями таких моделей по-прежнему остаются сложности визуализации и количественно-

го анализа [3,4]. В настоящей работе мы определили и валидировали подход к мультипараметрическому анализу изображений 3D-сфераидов клеток рака поджелудочной железы (PANC-1, CFPAC-1) и колоректального рака (HCT116, LoVo) с использованием системы Celena X, программы CellProfiler и языка программирования Python. Предложен способ извлечения морфометрических признаков и генерации итоговой метрики, основанной на методе главных компонент (PCA), которая показывает высокую корреляцию с результатами флуориметрического пролиферативного теста. Предложенный алгоритм (рис. 1) позволил улучшить чувствительность анализа в случаях высокой вариабельности данных и отсутствия классических кривых  $IC_{50}$ , особенно для клеточных линий со сложной морфологией сфераидов (например, LoVo). Разработанный подход может быть адаптирован для любых лабораторных систем визуализации, поддерживающих оптическую съёмку, и интегрирован в высокопроизводительный



скрининг новых молекулярных соединений.

Рисунок 1. Схематическое изображение итогового процесса анализа изображений сфероидов.

#### Библиографический список

1. Ock J., Li W. A high-throughput three-dimensional cell culture platform for drug screening // *Bio-des. Manuf.* 2020. Vol. 3, № 1. P. 40–47.
2. Lv D. et al. Three-dimensional cell culture: A powerful tool in tumor research and drug discovery (Review) // *Oncology Letters*. Spandidos Publications, 2017. Vol. 14, № 6. P. 6999–7010.
3. Wang Y., Jeon H. 3D cell cultures toward quantitative high-throughput drug screening // *Trends in Pharmacological Sciences*. 2022. Vol. 43, № 7. P. 569–581.
4. Costa E.C. et al. 3D tumor spheroids: an overview on the tools and techniques used for their analysis // *Biotechnology Advances*. 2016. Vol. 34, № 8. P. 1427–1441.

# ТЕРАГЕРЦОВАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ

GaAs/AlGaAs

Н.Ю. Харин\*, М.Я. Винниченко,  
В.Ю. Паневин, Д.А. Фирсов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

\*[harin\\_nyu@spbstu.ru](mailto:harin_nyu@spbstu.ru)

Излучение терагерцового спектрального диапазона может использоваться для медицинских приложений [1], в системах безопасности [2], а также для решения задач физики твердого тела [3]. Использование различных методов исследований в данных приложениях ограничено тем фактом, что большинство существующих излучателей и детекторов, работающих в терагерцовом спектральном диапазоне, функционируют только в лабораторных условиях. В настоящий момент компактным и достаточно мощным твердотельным источником терагерцового излучения является квантово-каскадный лазер, но его применение ограничено высокой стоимостью, связанной со сложной технологией производства, а также необходимостью поддержания криогенных температур для его использования. Таким образом, исследование и разработка новых физических основ генерации терагерцового излучения является актуальной задачей.

В работе [4] была исследована эмиссия терагерцового излучения из легированных квантовых ям GaAs/AlGaAs в условиях межзонного оптического возбуждения неравновесных носителей заряда. Эффективное опустошение донорных состояний осуществлялось стимулированным излучением ближнего инфракрасного (ИК) диапазона, которое создавалось в структуре благодаря наличию волновода и оптического резонатора. Ожидаемого авторами роста интенсивности терагерцового излучения получить не удалось из-за возникновения стимулированного излучения ближнего ИК диапазона, связанного с переходами электронов в валентную зону с возбужденных уровней донорной примеси. В результате зависимость интенсивности терагерцового излучения от интенсивности излучения накачки имела немонотонный характер. В настоящей работе подобные исследования терагерцового излучения из легированных квантовых ям впервые проведены в присутствии продольного электрического поля. В относительно слабых полях происходит ионизация возбужденных состояний примеси, что может привести не только к ослаблению захвата электронов из электронной подзоны в возбужденные донорные состояния, но и к увеличению интенсивности переходов зонных электронов на основное состояние примеси с испусканием терагерцовых фотонов.

Структура с набором квантовых ям была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs. Квантовые ямы были образованы чередующимися слоями GaAs и твердого раствора  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  и легированы

кремнием с поверхностной концентрацией  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Согласно расчету, выполненному в работе [5], энергия ионизации основного состояния донорной примеси кремния в подобной структуре равна 12 мэВ. В плоскости структуры прикладывалось электрическое поле, для этого на поверхности образца были сформированы индивидуальные контакты, которые вжигались при температуре 450 °C в атмосфере азота в течение 50 минут. Образец помещался в криостат замкнутого цикла, который позволял управлять температурой в диапазоне 4–300 К.

Эксперимент состоял из трех этапов: измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ), измерение спектров фотолюминесценции в ближнем ИК диапазоне, измерение интегральной интенсивности терагерцового излучения. Спектры ИК фотолюминесценции были получены с помощью решеточного монохроматора, детектором выступала кремниевая ПЗС матрица. Образец засвечивался непрерывным зеленым лазерным излучением, которое было промодулировано механическим прерывателем. Оптический и электрический импульсы, подаваемые на образец, были синхронизированы. Для измерения интегральной интенсивности терагерцового излучения напротив образца на расстоянии 12 мм располагался кристалл Ge:Ga, обладающий чувствительностью в диапазоне энергий кванта 10–30 мэВ.

Измерения ВАХ при разных температурах позволили установить поле пробоя примеси в данной структуре равное 26 В/см. На спектрах низкотемпературной фотолюминесценции без приложения электрического поля наблюдается ряд особенностей, обусловленных излучательной рекомбинацией свободных и связанных с нейтральными донорами экситонов в квантовых ямах, а также с переходами электронов с основного состояния донорной примеси в первую подзону тяжелых дырок. На зависимостях интегральной интенсивности терагерцовой фотолюминесценции без приложения электрического поля наблюдается монотонный (степенной) характер увеличения интенсивности терагерцового излучения с увеличением мощности оптической накачки. При приложении электрического поля как при частичной, так и при полной ионизации примеси наблюдается изменение характера зависимости интегральной интенсивности терагерцового излучения от мощности оптической накачки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-12-00036.

#### Библиографический список

1. *Nikitkina A. I., Bikmulina P. Y., Gafarova E. R. et al. // Journal of Biomedical Optics. 2021. V. 26. № 4. P. 043005-043005.*
2. *Dolganova I. N., Zaytsev K. I., Metelkina A. A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. № 11. P. 113704.*
3. *Ulbricht R., Hendry E., Shan J. et al. // Rev. Mod. Phys. American Physical Society. 2011. V. 83. № 2. P. 543–586.*
4. *Makhov I. S., Panarin V. Y., Firsov D. A. et al. // J. Lumin. 2019. V. 210. P. 352–357.*
5. *Mailhot C., Chang Y. C., McGill T. C. // Physical Review B. 1982. V. 26. № 8. P. 4449.*

# ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ С ЭЛЕКТРОННЫМ СЧИТЫВАНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКОГО КАРКАСА HKUST-1

**В.В. Харитонова<sup>1\*</sup>, А.В. Любимова<sup>1</sup>,  
В.А. Миличко<sup>1, 2</sup>, С.В. Бачинин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург 190000, Российская Федерация;

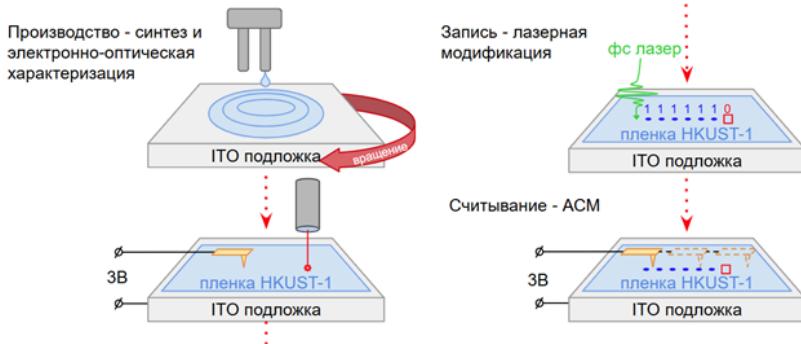
<sup>2</sup> Universite de Lorraine, Nancy 54000, France

*\*v.kharitonova@metalab.ifmo.ru*

Сегодня информация является одним из важнейших ресурсов и продуктов человеческой цивилизации. В настоящее время в мире ежедневно производится около 300 миллионов терабайт данных, и этот объем растет экспоненциально из года в год, требуя хранения и обработки. Традиционные устройства памяти имеют относительно высокое энергопотребление, ограниченный срок службы и емкость, что требует постоянной перезаписи существующих данных для их сохранения. Таким образом, для того, чтобы удовлетворить потребность в хранении все возрастающих объемов данных, можно идти разными путями развития. Оставаясь в парадигме хранения данных на полупроводниковых носителях, можно усовершенствовать существующие технологии для устраниния ошибок и продления срока службы носителей или модифицировать методы записи на уже известных материалах [1-6]. В отличие от таких традиционных электронных технологий, можно также рассмотреть альтернативные методы и материалы [7-11]. Также, в связи с рекордно быстрым развитием новых оптико-электронных систем обработки и хранения информации, необходимо искать новые подходы к записи и считыванию электронной информации. Например, в настоящее время большой интерес представляет технология лазерной записи [12] для хранения данных, поскольку она достаточно быстра, может использоваться в трех измерениях для записи данных с высокой плотностью. Что касается новых материалов, то и металл-органические каркасы (МОК) [11, 13-14] вызывают большой интерес в области науки о данных из-за их масштабируемости, простоты синтеза [15] и высокой (электронной, оптической и структурной) чувствительности к таким стимулам, как напряжение или свет [16-21].

В данной работе нами демонстрируется методика оптической записи и чтения бинарной информации на пленке МОК HKUST-1 на основе ионов меди, связанных бензол-1,3,5-трикарбоксилатными линкерами (см. рис. 1) [22]. Для этого тонкая пленка HKUST-1 толщиной 1,2 мкм была синтезирована на подложке ИТО методом центрифугирования. Затем бинарная информация была записана на поверхность МОК сфокусированным лазерным излучением в течение 0,5 с. Тонкая пленка HKUST-1 в исходном состоянии представляет из себя диэлектрик с относительно однородным распределением поверхностного потенциала, кото-

рому можно присвоить значение информационного «0». После этого пленка подвергается точечной лазерной модификации, в процессе которой локально меняется проводимость структуры, что соответствует новому значению потенциала или состоянию «1», эквивалентному 1 биту информации. Считывание записанной информации производится на атомно-силовом микроскопе полуконтактным методом зонда Кельвина, являющимся методикой сканирования распределения поверхностного потенциала, а также дающим информацию о латеральных размерах считываемого бита. Таким образом, нам удалось осуществить запись бинарной информации, локально изменив значение потенциала с 1 мВ до 100 мВ в пределах 1,5 мкм. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований методов быстрой оптической и энергонезависимой мемристивной записи электронных данных с совместимой плотностью на поверхность МОК, исключая необходимость поддержания специальных темпера-



турно-влажностных условий, отличных от окружающей среды.

Рисунок 1 - схема полного цикла создания и работы устройства памяти на основе пленки HKUST-1

#### Библиографический список

1. Wan S., Cao Q., Xie C. Optical storage: an emerging option in long-term digital preservation // *Frontiers of Optoelectronics.* – 2014. – Т. 7. – С. 486-492.
2. Dai D. et al. Recent advances in functional materials for optical data storage // *Molecules.* – 2024. – Т. 29. – №. 1. – С. 254.
3. Schumann M. et al. Hybrid 2D–3D optical devices for integrated optics by direct laser writing // *Light: Science & Applications.* – 2014. – Т. 3. – №. 6. – С. e175-e175.
4. Gu M., Li X., Cao Y. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage // *Light: Science & Applications.* – 2014. – Т. 3. – №. 5. – С. e177-e177.
5. Stupakiewicz A. et al. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium // *Nature.* – 2017. – Т. 542. – №. 7639. – С. 71-74.
6. Sun H. et al. Smart responsive phosphorescent materials for data recording and security protection // *Nature communications.* – 2014. – Т. 5. – №. 1. – С. 3601.
7. Gu M., Zhang Q., Lamon S. Nanomaterials for optical data storage // *Nature Reviews Materials.* – 2016. – Т. 1. – №. 12. – С. 1-14.

8. Falcaro P. et al. Patterning techniques for metal organic frameworks //Advanced Materials. – 2012. – T. 24. – №. 24. – C. 3153-3168.
9. Balena A. et al. Recent advances on high-speed and holographic two-photon direct laser writing //Advanced Functional Materials. – 2023. – T. 33. – №. 39. – C. 2211773.
10. Zhang Y., Chang C. H. Metal–organic framework thin films: Fabrication, modification, and patterning //Processes. – 2020. – T. 8. – №. 3. – C. 377.
11. Kulachenkov N. et al. MOF-Based Sustainable Memory Devices //Advanced Functional Materials. – 2022. – T. 32. – №. 5. – C. 2107949.
12. Zhestkij N. A. et al. Grayscale to Multicolor Laser Writing Inside a Label-Free Metal–Organic Frameworks //Advanced Functional Materials. – 2024. – T. 34. – №. 30. – C. 2311235.
13. Amiri A., Mirzaei M. (ed.). Metal–Organic Frameworks in Analytical Chemistry. – Royal Society of Chemistry, 2023.
14. Freund R. et al. The current status of MOF and COF applications //Angewandte Chemie International Edition. – 2021. – T. 60. – №. 45. – C. 23975-24001.
15. Gu Z. G., Zhang J. Epitaxial growth and applications of oriented metal–organic framework thin films //Coordination Chemistry Reviews. – 2019. – T. 378. – C. 513-532.
16. Bachinin S. V. et al. Metal-organic framework single crystal for in-memory neuromorphic computing with a light control //Communications Materials. – 2024. – T. 5. – №. 1. – C. 128.
17. Kulachenkov N. et al. Dimensionality mediated highly repeatable and fast transformation of coordination polymer single crystals for all-optical data processing //Nano Letters. – 2022. – T. 22. – №. 17. – C. 6972-6981.
18. Ma Z. Z. et al. Electrically regulating nonlinear optical limiting of metal-organic framework film //Nature Communications. – 2022. – T. 13. – №. 1. – C. 6347.
19. Yang X. X. et al. Chiral liquid crystalline metal–organic framework thin films for highly circularly polarized luminescence //Journal of the American Chemical Society. – 2024. – T. 146. – №. 23. – C. 16213-16221.
20. Chang L. M. et al. Surface-oriented assembly of cyclodextrin metal–organic framework film for enhanced peptide-enantiomers sensing //CCS Chemistry. – 2022. – T. 4. – №. 11. – C. 3472-3481.
21. Bachinin S. V. et al. Memristive behavior of UiO-66 metal-organic framework single crystal // Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications. – 2024. – T. 58. – C. 101206.
22. Kharitonova V. et al. Direct laser writing of binary data on metal-organic framework surface // Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications. – 2025. – C. 101385.

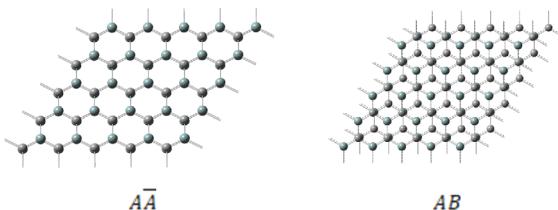
## СТРУКТУРНО-ЗАВИСИМЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Д.А. Жукалин, И.И. Долгих, Я.С. Часовских\*

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия  
 \*chasovskikh@phys.vsu.ru

Уникальные физические свойства низкоразмерных систем обусловили значительный интерес к изучению, открыв широкие перспективы для создания новых устройств и технологий. В настоящее время активно изучаются особенности двумерных и квазидвумерных полупроводниковых материалов, в частности карбид кремния (SiC). Материалы на его основе демонстрируют набор уникальных электронных и оптических свойств, открывающие новые возможности для практических применений в передовых конструкциях наноустройств [1, 2]. При этом исследования, посвященные типам упаковки графеноподобных монослоев карбida кремния, встречаются редко. Это создает пробел в понимании зависимости характеристик многослойных структур от типа упаковки монослоев.

В настоящей работе [3] рассмотрены многослойные структуры на основе атомарно тонкого карбida кремния с числом слоев 2 – 4. Рассмотрены следующие конфигурации (рис. 1): структуры типа  $\overline{AA}$ , с инверсией типа атомов в четных слоях; структуры типа  $AB$ , полученные смещением четных слоев относительно нечетных таким образом, что атомы углерода располагаются в центрах шестиугольных ячеек нечетных слоев. Расчеты были выполнены с использованием программного комплекса для решения квантово-химических задач Gaussian 9 методом теории функционала плотности (DFT) в приближении локальной спиновой плотности (LSDA).



При изучении структурных изменений установлено, что количество слоев и их взаимное расположение позволяют изменять положение экстремумов зон валентности и проводимости, а также управлять шириной запрещенной зоны. Показано, что структуры семейства  $\overline{AA}$  являются непрямозонными полупроводниками (рис. 2), а структуры семейства  $AB$  обладают прямозонным характером (рис. 3). Установлено, что увеличение числа слоев в обоих семействах ведет к уменьшению ширины запрещенной зоны структур. Дискретный ряд ширин запрещенных зон лежит в диапазоне от 0,82 до 2,15 эВ, что охватывает область спектра от видимого красного до ближнего инфракрасного диапазона.

Интерес вызывает четырехслойная структура типа  $AB$  (рис. 3). Ячейка квазикристалла стала аналогичной кубическому политипу 3С. В рассматриваемой структуре установлено асимптотическое стремление ширины межзонного перехода к нулю (табл. 1), что сильно отличается от значения в макроскопических образцах карбida кремния ( $E_{g-3C} = 2.4$  эВ) [4].

Таблица 1. Электрофизические свойства 2D-структур  $\text{SiC}$  в зависимости от числа и конфигурации слоев ( $R_{\text{Si-C}}$  – длина связи между атомами углерода и кремния в пределах слоя;  $R_{\text{sh}}$  – межслоевое расстояние,  $E_b$  – приведенная энергия связи;  $E_{\text{bsh}}$  – приведенная межплоскостная энергия связи;  $E_{g-\text{M}\bar{\Gamma}\bar{K}}$ ,  $E_{g-\text{M}'\bar{\Gamma}\bar{K}'}$  – ширина запрещенной зоны в направлениях  $\text{M}\bar{\Gamma}\bar{K}$  и  $\text{M}'\bar{\Gamma}\bar{K}'$ )

Структура	$R_{\text{Si-C}}$ , Å	$R_{\text{sh}}$ , Å	$E_b$ , эВ/атом	$E_{\text{bsh}}$ , эВ/атом	$E_{g-\text{M}\bar{\Gamma}\bar{K}}$ , эВ	$E_{g-\text{M}'\bar{\Gamma}\bar{K}'}$ , эВ
$\bar{A}\bar{A}$	1,846	2,200	8,444	0,242	2,15	2,15
$\bar{A}\bar{A}\bar{A}$	1,837	2,334	8,524	0,403	1,57	1,582
$\bar{A}\bar{A}\bar{A}\bar{A}$	1,843	2,362	8,558	0,463	0,82	0,838
$\bar{A}\bar{B}$	1,805	3,243	8,401	0,156	1,403	1,715
$\bar{A}\bar{B}\bar{A}$	1,804	3,174	8,433	0,223	1,326	1,364
$\bar{A}\bar{B}\bar{A}\bar{B}$	1,89	3,106	8,473	0,293	0,04	0,04

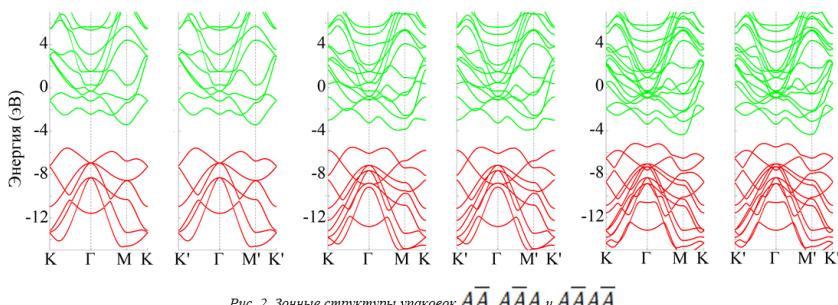
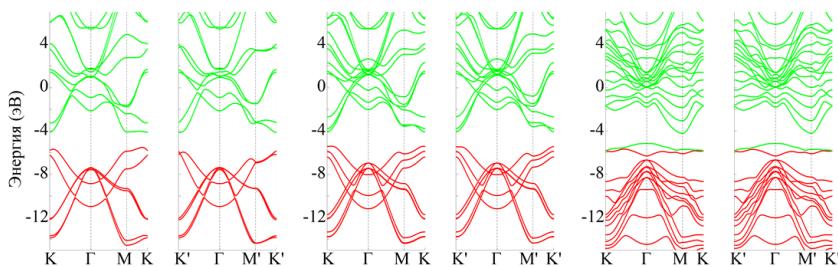


Рис. 2. Зонные структуры упаковок  $\bar{A}\bar{A}$ ,  $\bar{A}\bar{A}\bar{A}$  и  $\bar{A}\bar{A}\bar{A}\bar{A}$ .



### Библиографический список

1. Predicting two-dimensional silicon carbide monolayers / Z. Shi, Z. Zhang, A. Kutana [et al.] // ACS Nano. – 2015. – V. 9(10). – P. 9802-9809.
2. New stable two dimensional silicon carbide nanosheets / Q. Wei, Y. Yang, G. Yang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – V. 868. – № 159201.
3. Д. А. Жукалин, А. В. Тучин, А. В. Калашников [и др.]. Зонная структура графеноподобных 2D аллотропов карбида кремния // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67, № 1. – С. 83-89.
4. O'Connor J. Silicon Carbide, a High Temperature Semiconductor: Proceedings of the Conference on Silicon Carbide // J. O'Connor, J. Smiltens. – Boston: Pergamon Press, 1960. – 421 p.

# МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ФОТОЛИТОГРАФИИ С УЧЁТОМ НЕРОВНОСТИ КРАЯ ЛИНИИ КАК СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

А.А. Шарапов<sup>1,2\*</sup>, Е.С. Горнев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «НИИМЭ», г. Зеленоград, РФ;

<sup>2</sup> МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, РФ

*\*andrey.sharapov@phystech.edu*

Современное производство интегральных схем представляет собой последовательность строго контролируемых этапов, где по мере уменьшения критических размеров накопление ошибок между стадиями требует всё более жёстких допусков и высокой точности на каждом шаге [1]. Особенno это актуально для этапа формирования изображения в фотолитографии, где накопленные отклонения могут существенно повлиять на точность переноса и характеристики получаемых структур. В этой связи особое внимание уделяется ошибке позиционирования края (Edge Placement Error, EPE) – отклонению фактического положения границ элементов, таких как линии или контакты, от их проектного положения [2]. Накопление ошибки позиционирования края обусловлено как систематическими (аберрации оптической системы, нелинейный отклик фотоприемника, ошибки совмещения масок и деформации подложки и др.), так и стохастическими факторами (флуктуации компонентов фотоприемника, их диффузия, статистика деблокирования и проявления, фотонный шум и др.). Одной из составляющих ошибки позиционирования края, связанной с влиянием стохастических факторов, является неровность края линии (Line Edge Roughness, LER).

С развитием технологий и уменьшением критических размеров структур до 20 нм и ниже, влияние неровности края возрастает [3]. В условиях, когда допустимая погрешность составляет единицы нанометров, а технологические допуски приближаются к ангстремам, даже минимальные вариации края становятся критичными. При многократном паттернировании вызванные неровностью края отклонения могут приводить к вариациям межлинейного расстояния, нарушающим симметрию критических структур, усложняющим точное совмещение масок и создающим локальные вариации плотности рисунка. В результате данные эффекты могут вызывать искажения формы элементов, значительное отклонение критических размеров, а также приводить к образованию коротких замыканий и функциональных дефектов в интегральных микросхемах.

В этой связи возникает необходимость в построении моделей литографического процесса, способных учитывать стохастическую природу неровности края линии. Это особенно актуально в условиях развития технологий интегральной микроэлектроники для проектных норм 180–90 нм и ниже, включающего разработку передовых фотоприемников. Работа по созданию новых материалов, среди

прочего, заключается в определении наиболее удачной композиции химических веществ, составляющих фоторезист. Каждая новая композиция резиста должна быть исследована непосредственно на производственном оборудовании. Поэтому увеличение числа итеративных оптимизаций состава приводит к увеличению количества производственных экспериментов, что, в свою очередь, увеличивает время простоя оборудования. Таким образом, задача точного моделирования переноса рисунка с фотошаблона на слой фоторезиста на подложке является крайне актуальной.

Для решения этой задачи могут быть использованы два типа моделей — полные и компактные. Полные стохастические модели обладают высокой точностью, но являются чрезмерно ресурсоёмкими [4]. Компактные модели демонстрируют высокую производительность, поэтому их используют для моделирования всего чипа [5]. Однако ключевым недостатком таких моделей является их неуниверсальность: из-за упрощения они не могут точно описать широкий диапазон параметров процесса, и поэтому их коэффициенты калибруются специально для конкретного процесса. Эти коэффициенты также не имеют явного физического смысла, поэтому даже небольшое изменение в процессе требует перекалибровки модели. Таким образом, указанные виды моделей не могут быть использованы для разработки процессов.

В данной работе предлагается **промежуточный подход**, сочетающий физическую обоснованность и необходимость относительно небольшого числа экспериментальных данных о свойствах композиции фоторезиста с включением стохастического фактора, напрямую связанного с неровностью края. Разработанная модель описывает скорость проявления фоторезиста как функцию от интегрированного кислотного изображения с учётом флуктуаций химического контраста:

По сравнению с ранее известными подобными моделями, данная реализация включает стохастический фактор, выражющийся в варьирующемся значении химического контраста резиста  $\Delta\gamma(\vec{x})$ :

$$\text{где } R(\vec{x}) = R_0 \left( \frac{E}{E_0} S(\vec{x}) \right)^{\gamma + \Delta\gamma(\vec{x})} + R_{min}$$

$\gamma$  — химический контраст фоторезиста,

$R_{min}$  — скорость проявления неэкспонированного фоторезиста,

$R_0$  — калибровочный коэффициент,

$E_0$  — доза полного проявления,

$S(\vec{x})$  — интегрированное кислотное изображение.

Модель включает ряд параметров, характеризующих ключевые процессы: дозу начала деблокирования, коэффициенты диффузии кислот и оснований, скорость нейтрализации, поправки к дозовым характеристикам, а также комплексный показатель преломления. Это позволяет моделировать процессы экс-

понирования, постэкспозиционной сушки и проявления. Оптимизация параметров выполнена на основе сопоставления с профилями, полученными методом сканирующей электронной микроскопии.

Предлагаемая модель валидирована по экспериментальным данным для отечественных фоторезистов, предназначенных для длин волн 248 нм и 193 нм, и потенциально применима для оценки формы профиля и характеристик неровности края в заданных условиях.

#### **Библиографический список**

1. Горнев Е.С. Обеспечение надёжности современных интегральных микросхем. Часть 2. Насущные проблемы // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2023. – 2(194). – С. 121-135.
2. Mack C.A., Adel M. Overlay and Edge Placement Error Metrology in the Era of Stochastics // Proc. SPIE 12496, Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII. – 2023. – 1249609.
3. Brunner T. A. et al. Line-edge roughness performance targets for EUV lithography // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2017.
4. Hansen S. G. Photoresist and stochastic modeling // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2018. – Vol. 17. No. 01. – C. 1.
5. Харченко Е.Л., Соколова Е.В., Горнев Е.С. Развитие и применение компактных моделей фоторезистивной маски // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-2(119). – С. 508-511.

## **ДЕТЕКТОРЫ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАТОНКИХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaN К.Ю. Шубина<sup>1\*</sup>, О.А. Синицкая<sup>1</sup>, Я.Б. Эннс<sup>1</sup>, А.В. Уваров<sup>1</sup>, А.М. Мизеров<sup>1</sup>, Е.В. Никитина<sup>1</sup>**

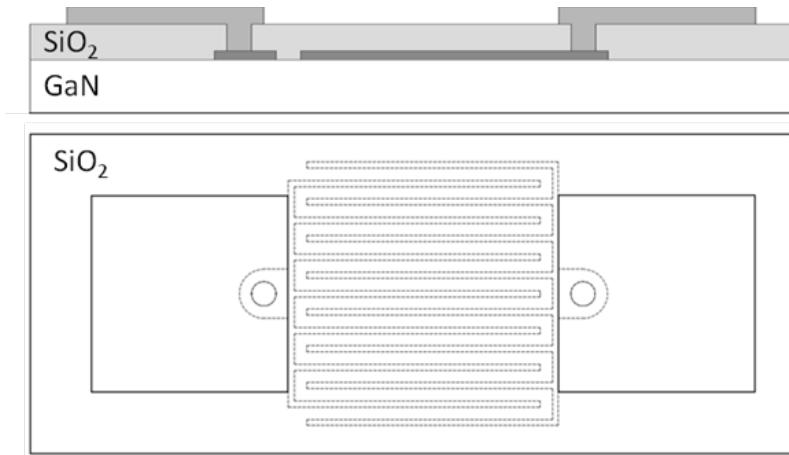
<sup>1</sup>Алферовский Университет, Санкт-Петербург, Россия

*\*kshubina@spbau.ru*

Полупроводниковые материалы на основе III-N соединений, в частности нитрид галлия, благодаря своим уникальным свойствам сегодня являются одними из наиболее востребованных и перспективных материалов оптоэлектроники, как для изготовления светоизлучающих устройств, так и фотоприемников на их основе, в частности, фотодетекторов (ФД), работающих в УФ диапазоне. Для создания УФ фотоприемников помимо использования планарных гетероструктур на основе III-N соединений (и других широкозонных полупроводников), в настоящее время большое внимание уделяется исследованию применения для этих целей различныхnanoструктур на основе данных материалов, например, нитевидных нанокристаллов, наноцветов, нанобашен и др., а также ультратонких эпитаксиальных слоев с развитой морфологией поверхности [1]. В докладе будут рассмотрены особенности технологии изготовления ФД ближнего УФ диапазона

на основе ультратонких эпитаксиальных слоев GaN и представлены результаты экспериментальных исследований характеристик таких фотоприемников.

Ультратонкие (толщиной до 350 нм) нелегированные слои GaN были выращены на предварительно подготовленных сапфировых подложках методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на уникальной в России установке Veeco GEN200. Синтезированные слои обладают характерной лабиринтоподобной морфологией поверхности. С помощью стандартных подходов фотолитографии и электронно-лучевого и термического вакуумного испарения были изготовлены образцы фотодетекторов типа металл-полупроводник-металл. На поверхности GaN были сформированы полупрозрачные встречноштыревые контакты на основе бислойной металлизации Ni/Au. Кроме того, на основе анализа более ранних результатов нашей группы по данной теме [2], была доработана и усовершенствована конструкция ФД металл-полупроводник-металл, а именно: 1) для уменьшения темнового тока было использовано покрытие из  $\text{SiO}_2$ , которое одновременно выполняет функцию пассивирующего и защитного слоя; 2) были значительно уменьшены геометрические размеры контактных площадок на «гребенках»; 3) добавлены верхние контактные площадки из Au, соединяющиеся с встречноштыревыми элементами через «окна» в слое  $\text{SiO}_2$ . Схема предложенной конструкции приведена на рис. 1.



*Рисунок 1. Схематическое изображение (поперечное сечение и вид сверху) усовершенствованной конструкции детектора металл-полупроводник-металл*

ФД с новой конструкцией также были изготовлены с помощью стандартных подходов фотолитографии, покрытие  $\text{SiO}_2$  наносилось методом плазмохимического осаждения. Размер фоточувствительной области изготовленных детекторов со встречноштыревыми электродами  $1.15 \times 1.08$  мм.

По результатам измерений ВАХ (темновых и при освещении УФ светодиодом с длиной волны излучения 365 нм, приведены на рис. 2, а) изготовленных ФД было установлено, что использование слоя диэлектрика  $\text{SiO}_2$  в конструкции ФД позволило не только снизить темновой ток приборов (минимальное значение на уровне 0.1 В составило 0.9 мА), но и значительно увеличить фототок. Это, в свою очередь, привело к увеличению отношения фототока к темновому току ФД по сравнению с аналогичной характеристикой ФД, изготовленных без пассивирующего слоя  $\text{SiO}_2$ , с 0.5 до 24.8 (рис. 2, б).

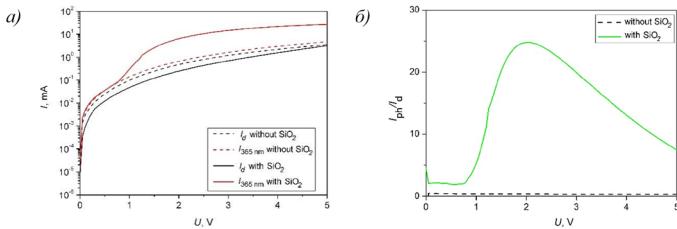


Рисунок 2. (а) ВАХ ФД, изготовленных без  $\text{SiO}_2$  (пунктир) и с использованием  $\text{SiO}_2$  (сплошная линия); (б) зависимость отношения фототока к темновому току изготовленных ФД от напряжения смещения

Таким образом, было продемонстрировано, что введенный в конструкцию

$$\begin{cases} n_{\text{воздуха}} < n_{\text{SiO}_2} < n_{\text{GaN}} \\ n_{\text{SiO}_2} \approx \sqrt{n_{\text{воздуха}} \times n_{\text{GaN}}} \end{cases}, \quad (1)$$

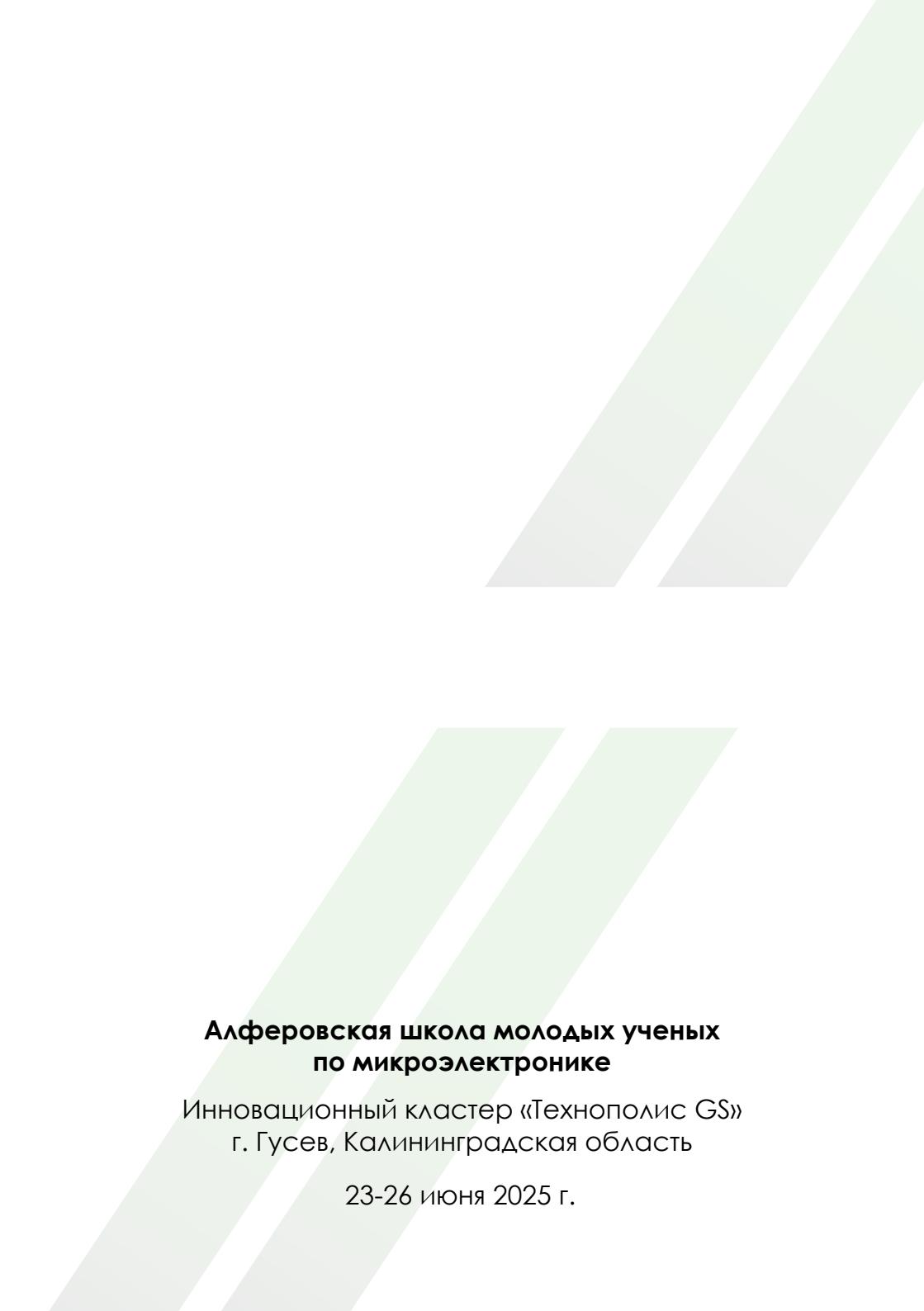
где  $n$  – показатель преломления среды [3].

ФД слой  $\text{SiO}_2$ , как и ожидалось, обеспечивает эффект пассивации поверхности GaN, что ведет к снижению темнового тока за счет подавления поверхностного тока утечки, а также к увеличению фототока за счет ограничения поверхностной рекомбинации фотогенерированных носителей заряда в GaN. Кроме того, слой  $\text{SiO}_2$  может выступать в качестве однослойного антиотражающего (просветляющего) покрытия для детекторов, работающих в ближнем УФ диапазоне, поскольку для системы сред воздух- $\text{SiO}_2$ -GaN выполняются условия:

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания FSRM-2023-0006 и поддержке Фонда содействия инновациям (соглашение № 12ГУПКЭС18/91736 от 27.12.2023).

#### Библиографический список

1. Ding J., Zhao P., Chen H., Fu H. //Applied Physics A. 2024. V. 130. №. 5. P. 350.
2. Sinitskaya O.A., Shubina K.Yu., Mokhov D.V., Uvarov A.V. et al. //St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. 2022. V. 60. №. 3. P. 157-162.
3. Фоточувствительный элемент ближнего ультрафиолетового диапазона [Текст]: пат. № 233037 Рос. Федерации : МПК H10D 8/30 (2025.01)



## **Алферовская школа молодых ученых по микроэлектронике**

Инновационный кластер «Технополис GS»  
г. Гусев, Калининградская область

23-26 июня 2025 г.