

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XXVI Международного  
симпозиума**

*14–17 марта 2022 г., Нижний Новгород*

*Том 2*

*Секция 3*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского  
2022

УДК 538.9  
ББК 22.37; 22.33  
Н-25

**Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXVI Международного симпозиума** (Нижний Новгород, 14–17 марта 2022 г.) В 2 т. Том 2. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2022. — 501 с.

ΦΩΡΑΪΪ Ì È ÈFHÇÈ È ØÈÈ Á

#### Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;  
Отделение физических наук РАН;  
Научный совет РАН по физике полупроводников;  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред;  
Институт физики микроструктур РАН;  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;  
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу».

#### Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН  
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

#### Учёный секретарь Симпозиума

Д.А. Татарский, к. ф.-м. н., ИФМ РАН

#### Программный комитет

А.Ю. Аладышкин, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салашенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород

#### Организационный комитет

В.Г. Беллюстин	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Д.А. Камелин	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Копасов,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.С. Михайленко	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Е. Пестов	ИФМ РАН, Н. Новгород

ΦΩΡΑΪΪ Ì È ÈFHÇÈ È ØÈÈ Á

ББК 22.37; 22.33



Симпозиум проводится при поддержке

## Генеральный спонсор симпозиума



Группа компаний НТ-МДТ Спектрум  
Инструментс, [ntmdt-si.ru](http://ntmdt-si.ru)

## Спонсор симпозиума

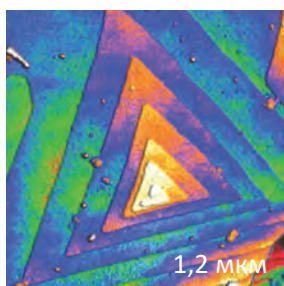
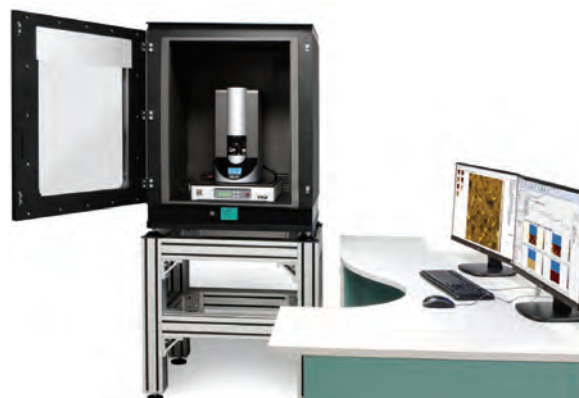


АО «Завод ПРОТОН (МИЭТ)», [z-proton.ru](http://z-proton.ru)

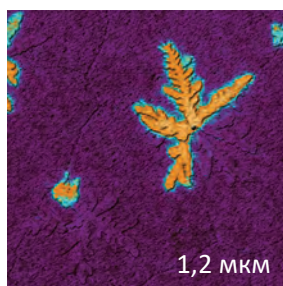
## NEXT II

### Результаты предельно высокого качества на повседневной основе

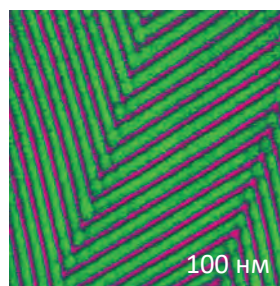
- Исследовательский АСМ с исключительным уровнем автоматизации подготовки и проведения эксперимента
- Рекордно низкий уровень шумов и высочайшая стабильность
- Полный набор самых современных методов АСМ, включая методы прыжковой микроскопии (Hybrid Mode™)



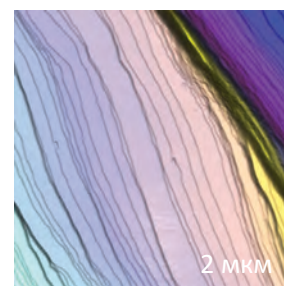
Остроконечная структура  $Al_2O_3$  полученная с использованием ScanTronic и в ручном режиме



Кристаллы пентацена. ЭСМ карта наложенная на рельеф



Молекулярные цепочки фторалканов F14H20 на слюде

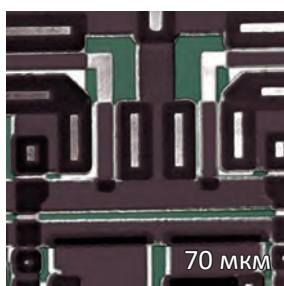


Кристалл поваренной соли

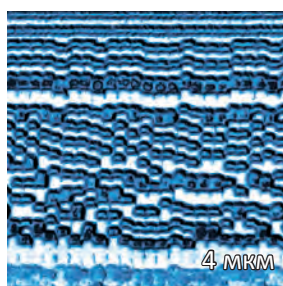
## VEGA

### Высокопроизводительный АСМ для исследования большеразмерных образцов

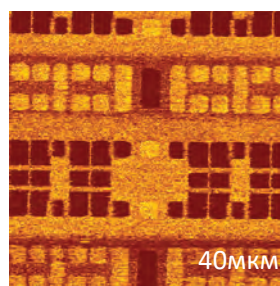
- Измерения рельефа и других поверхностных свойств с нанометровым пространственным разрешением на пластинах диаметром до 200 мм, большеразмерных образцах и массивах образцов
- Высочайший уровень автоматизации процессов настройки и измерений
- 50+ современных методов АСМ, включая методы высокоскоростной прыжковой микроскопии
- Быстрое сканирование для рутинных потоковых измерений морфологии структур



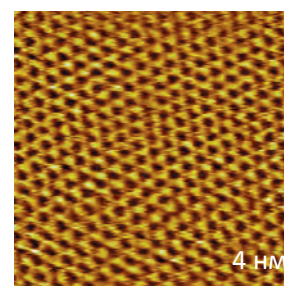
Рельеф фрагмента микросхемы



Магнитные домены в HDD 1 ТБ



Поверхностный пртенциал в SRAM

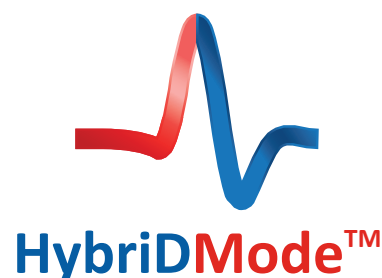


Атомное разрешение на графите

## Контроллер HD 2.0

### Реализует самый широкий набор методов прыжковой атомно-силовой микроскопии

- Неразрушающие исследования мягких, хрупких и плохо зафиксированных объектов
- Быстрые количественные наномеханические и объемно-силовые измерения, неразрушающие измерения проводимости, пьезоэлектрического отклика, теплопроводности и термоэлектрических свойств, измерения магнитно-силовой, электростатической, сканирующей емкостной или Кельвин-зондовой силовой микроскопией
- Новые возможности картирования в зондово-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния (2D TERS mapping)



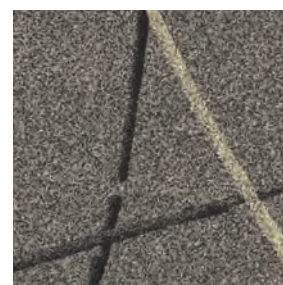
Рельеф



Адгезия



Модуль Юнга



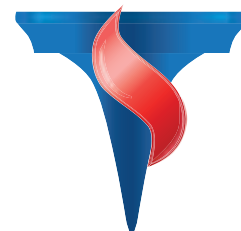
Латеральный пьезоотклик

Неразрушающее исследование пептидных нанотрубок на основе дифенилаланина методом Прыжковой АСМ. Размер скана: 7×7 мкм

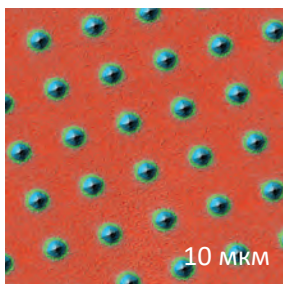
## ScanTronic™

### Программный модуль ScanTronic: полностью автоматическая настройка сканирования в полуконтактной АСМ

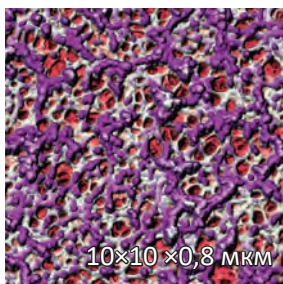
- Автоматическая настройка параметров обратной связи, амплитуды колебаний зонда, значения рабочей точки и скорости сканирования
- Выбор режима притяжения или отталкивания
- Сканирование без артефактов парашютирования или их компенсация
- Блестящие изображения рельефа и фазового контраста на образцах любой морфологии



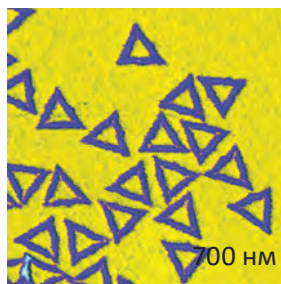
Техника дойдет до такого совершенства, что человек сможет обойтись без себя  
Станислав Ежи Лец



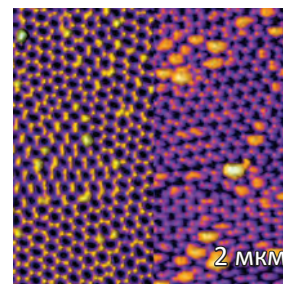
Массив заготовок АСМ зондов  
10 мкм



Нитроцеллюлозная мембрана  
10×10 × 0,8 мкм



ДНК-оригами на слюде  
700 нм

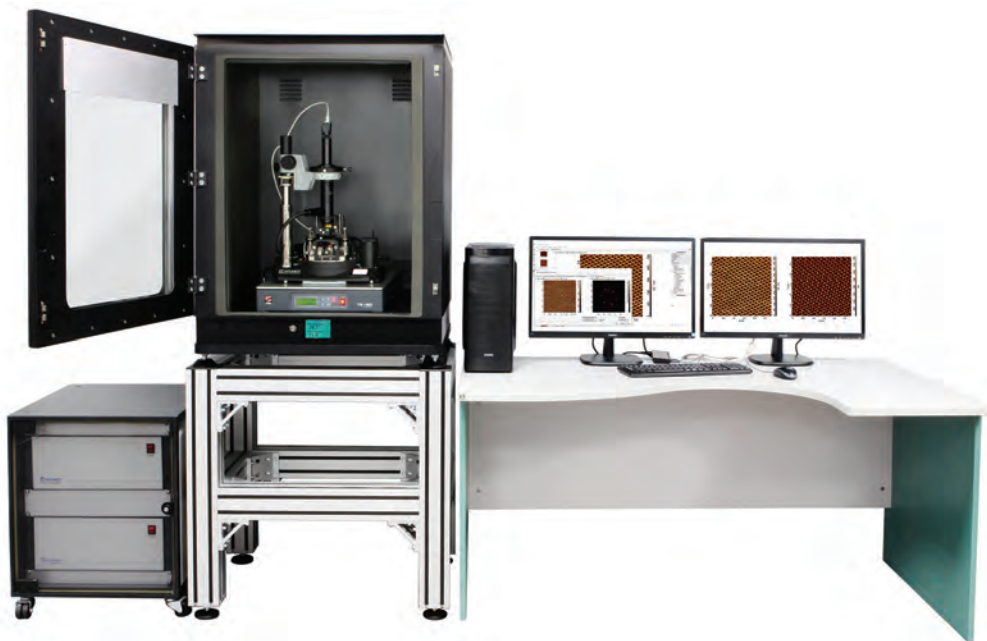


Остроконечная структура Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полученная с использованием ScanTronic и в ручном режиме  
2 мкм

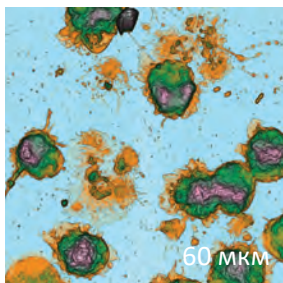


## NTEGRA II Pro

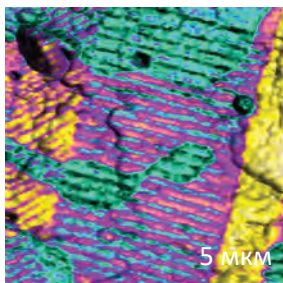
Легендарный АСМ для научных исследований, оснащенный всеми новейшими решениями



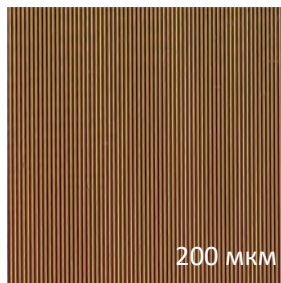
- Открытая архитектура: потрясающая гибкость системы и широчайшие возможности конфигурирования под конкретную научную задачу
- Все самые современные методы АСМ, включая самый широкий набор методов прыжковой микроскопии (Hybrid Mode)
- Автоматизация эксперимента благодаря интеллектуальному программному модулю ScanTronic
- Возможность развития до АСМ-Раман систем, систем микроскопии и спектроскопии нанометрового пространственного разрешения в видимом, ИК и ТГц диапазоне



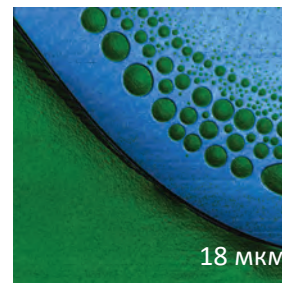
АСМ изображение нейтрофилов на стекле



Доменная структура тонкой пьезоэлектрической пленки



Изображение калибровочной решетки, полученное в конфигурации DualScan™

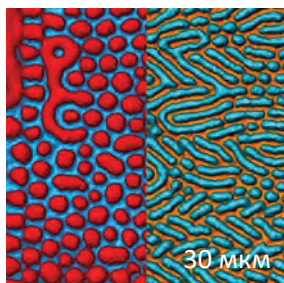
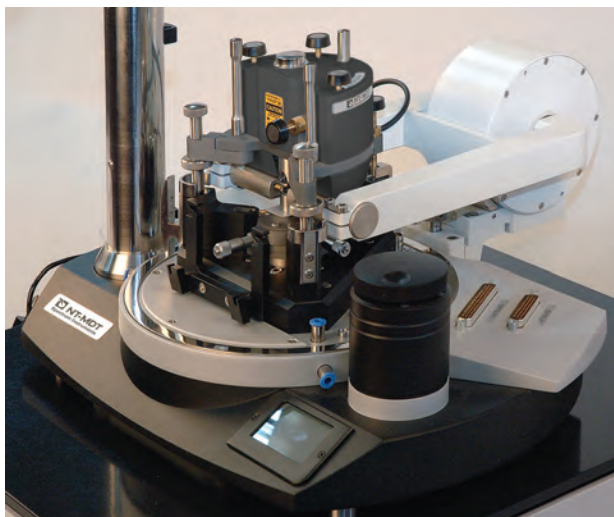


Карта модуля упругости смеси полистирола (голубой) с полиэтиленом (зелёный)

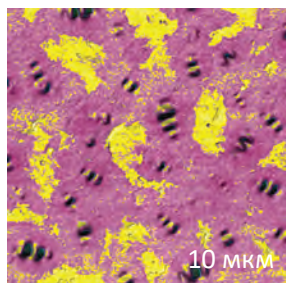
## NTEGRA II Pro - конфигурации и опции



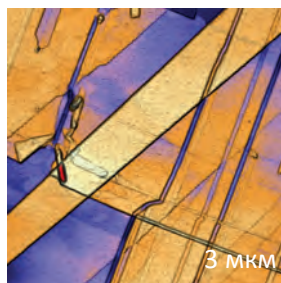
- Измерения в условиях низкого и среднего вакуума
- Измерения в жидкости и в условиях контролируемой атмосферы
- Измерения при приложении внешнего магнитного поля (горизонтального, вертикального)
- Конфигурации для сканирования зондом или образцом, а также конфигурация DualScan
- Доступ внешних устройств к сигналам АСМ
- Широкий выбор источников системы регистрации изгибов кантилевера на основе полупроводниковых лазеров или суперлюминисцентных диодов



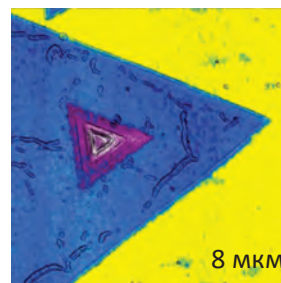
МСМ карты иттриевого железного граната до и после приложения латерального магнитного поля



Карта адгезии пленки битума



Поверхность ВОПГ в вакууме



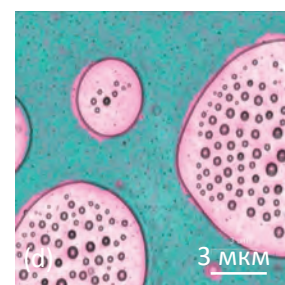
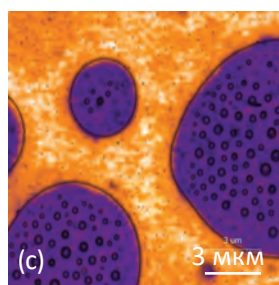
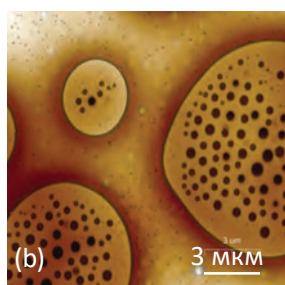
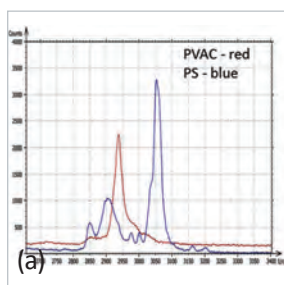
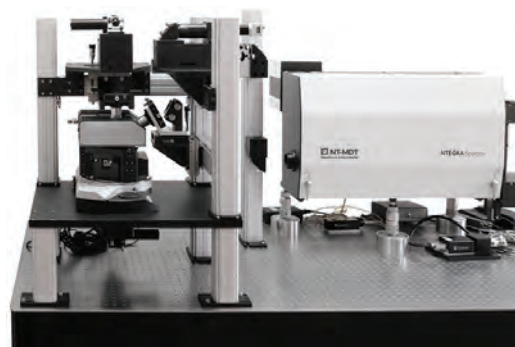
Карта поверхностного потенциала чешуек WS<sub>2</sub> выращенных на эпитаксиальном графене. Изображение получено в вакууме



## NTEGRA Spectra II

### Многофункциональная автоматизированная система для АСМ-Раман, СБОМ и TERS исследований

- Автоматизированный АСМ высокого разрешения
- Конструктивные решения, оптимизированные для TERS измерений: оптический доступ сверху, снизу и сбоку
- Модульная оптическая система позволяет реализовать любую конфигурацию возбуждения и сбора оптического отклика
- Автоматизированная настройка системы лазер-зонд-фотодиод
- Простая смена длины волны источника излучения оптической системы АСМ
- Легкая и точная настройка объективов
- Сохранность TERS зондов при картировании благодаря использованию Hybrid Mode™

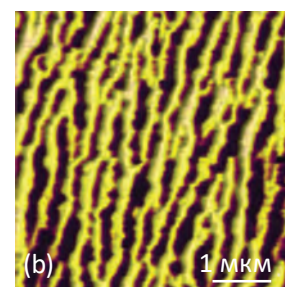
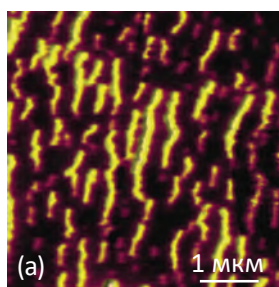
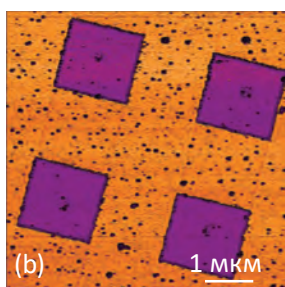
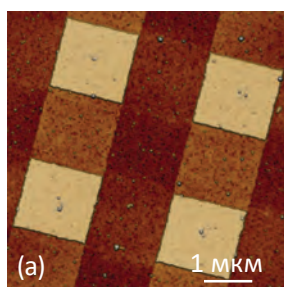
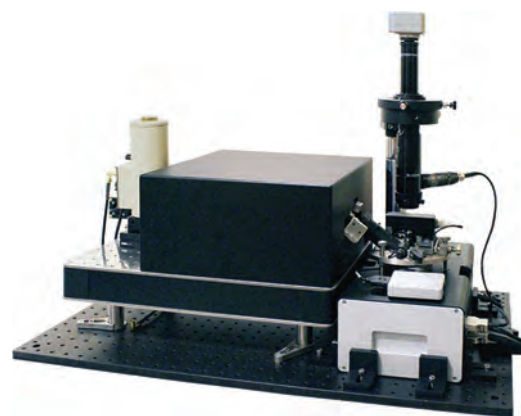


(a) Рамановские спектры поливинилацетата (PVAC) и полистирена (PS), (b) изображение рельефа пленки PS/PVAC. (c)-(d) Рамановские карты полос PVAC и PS

## NTEGRA nano IR

### Инфракрасная микроскопия и спектроскопия с нанометровым пространственным разрешением

- Рассеивающая ближнепольная оптическая микроскопия (s-SNOM) в видимом, инфракрасном (ИК) и ТГц диапазонах
- Низкий дрейф и высокая стабильность системы
- Универсальный исследовательский АСМ с полным набором самых современных методов исследования морфологии, наномеханических, электрических и магнитных свойств образца, включая методы прыжковой микроскопии (Hybrid Mode™)
- Интеллектуальная система ScanTronic™ обеспечивает оптимальную для получения s-SNOM контрастов настройку режима взаимодействия зонда и образца



Рельеф (a) и p-СБОМ амплитуда (b) решетки Si/SiO<sub>2</sub>

Наложенные на рельеф изображения контрастов отражения при 55 °C (a) и при 67 °C (b), λ= 10.6 мкм. Образец представлен prof. Liu (Stony Brook University, New York, USA)



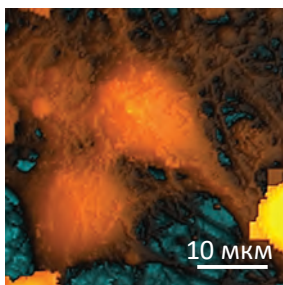
## NTEGRA Marlin

Новейшая система АСМ-Раман-СМИП  
для биологических исследований

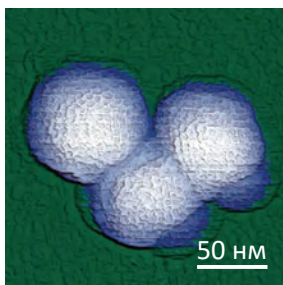
- Высокоскоростная сканирующая микроскопия ионной проводимости
- Бесконтактное исследование живых клеток в естественной физиологической среде
- Измерение механических свойств в широком диапазоне жесткостей
- Patch-clamp измерения с нанометровой локализацией
- Комбинация с оптическими методиками



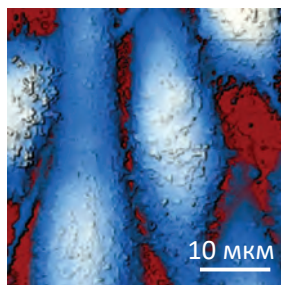
Проект реализуется при содействии  
Фонда содействия инновациям



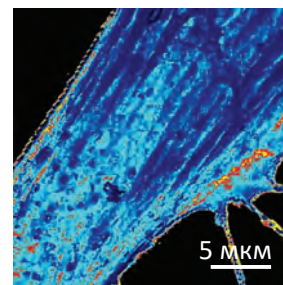
СМИП-изображение  
живого нейрона из  
гиппокампа мыши



АСМ-изображение частиц  
риновируса



СМИП-изображение  
клеток карциномы РС3  
предстательной железы  
человека



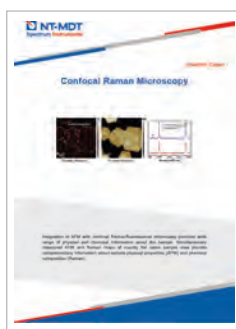
СМИП карта модуля  
упругости живого  
фибробласта.  
E=2 Pa..3,4 MPa

## Дайджесты научных статей

### Tip-Enhanced Raman Spectroscopy



### Confocal Raman Microscopy

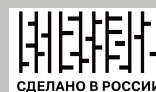


### Scanning Near-Field Optical Microscopy



## Контакты

Центральный офис: 4460, г. Москва, г. Зеленоград,  
проезд 4922, д. 4 стр. 3, 3 этаж  
Телефон: + 7 (499) 110-2050  
E-mail: [info@ntmdt-si.ru](mailto:info@ntmdt-si.ru)







# АО «Завод ПРОТОН»

124498, Москва, Зеленоград, пл.Шокина, д.1  
+7 (495) 364-60-93 b\_loginov@mail.ru metrology@z-proton.ru  
www.z-proton.ru www.microscopy.su www.микроскоп.su



## Микроскоп сканирующий зондовый «СММ-2000»

атомное разрешение в STM и AFM, неприхотливость к вибрациям и влажности, высокая надежность, применимость для учебной сборки/разборки в ВУЗ-ах, точность 1 нм выхода на ту же точку при обратной установке образца после его снятия, режимы снятия электропроводности, потенциалов, ёмкости, электро- и фото- люминесценции, фоточувствительности, эл.плотности, трения, адгезии, упругости, теплопроводности, вязкости, намагниченности, чувствительности с коэрцитивной силой, насыщением и остаточным полем по пьезо- и магнитным образцам и т.д., морфологический, фрактальный, Фурье-анализы и анализ шероховатости, регулировка температуры образца от -40°C до +150°C (опция +800°C), стоимость 590 000р., скидки от количества, срок поставки 10 дней, курсы обучения, сервис 10 лет.



UHV-cryo-STM, 5К, 10<sup>-11</sup>мбар



STM/AFM in-situ под магнетронами



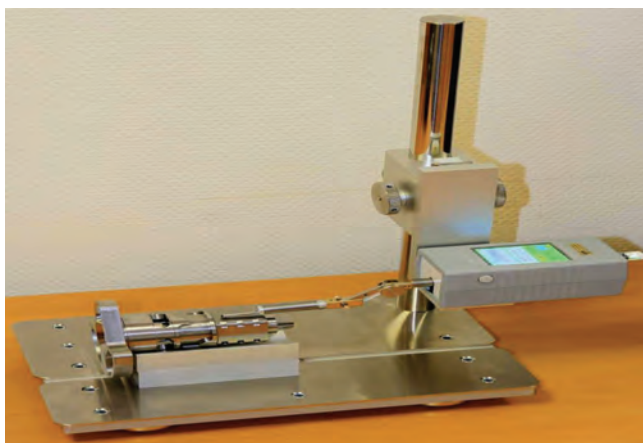
AFM с машиной разрыва



Магнетрон МАГ-2000 с блоком управления



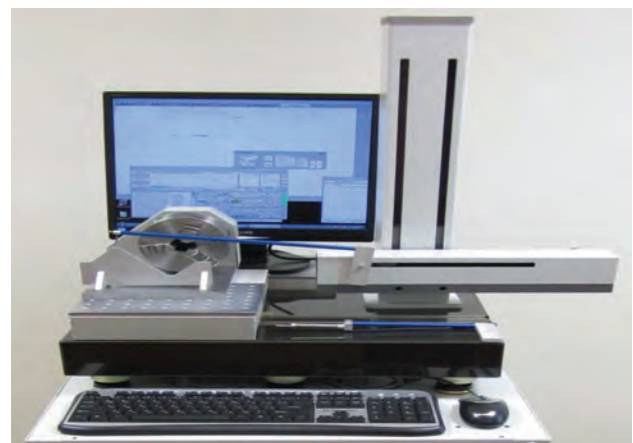
Меры ПРО-10  
Госреестр №66933-17  
Ra от 5нм до 80мкм



## Профилометр модели 130 <http://prof130.ru>

Измерение Ra, Rz и ещё 28 параметров шероховатости диапазон по Ra 0,012 – 50 мкм, чувствительность 0,001 мкм длина трассы до 40 мм, 1-14 класс по ГОСТ 2789

Госреестр №33319-13, межповерочный интервал 2 года цена 354 000р., скидки, поставка 20 раб.дней, с обучением



## Контурограф модели 220

Измерения длин, углов, радиусов, диаметров и шагов диапазон 220мм (опция 1000мм), чувствительность 0,1мкм погрешность длин 0,2%, углов 0,1°, радиусов 0,1%

Госреестр №58193-14, межповерочный интервал 2 года цена 1,9 млн.руб, поставка 30 раб.дней, с обучением



## **Секция 3**

**Полупроводниковые наноструктуры:  
электронные, оптические свойства,  
методы формирования**

# Quantum dot PL emission control through a nearby graphene layer

Diogo Cunha<sup>1</sup>, César Rui Bernardo<sup>1</sup>, Manuel Rodrigues<sup>1</sup>, Fatima Cerqueira<sup>1, 2</sup>, Vladimir A. Burdov<sup>3</sup>, Michael Belsley<sup>1</sup>, Peter Schellenberg<sup>1</sup>, Mikhail I. Vasilevskiy<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup> Centre of Physics - CF-UM-UP, University of Minho, camus de Guallar, Braga, 4710-057, Portugal.

<sup>2</sup> International Iberian Nano Laboratory - INL, Braga, Av. Mestre José Veiga s/n, 4715-330, Portugal

<sup>3</sup> Faculty of Physics, N. I. Lobachevsky State University, 23 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603122, Russia.

\*mikhail.vasilevskiy@inl.int

We present experimental data that demonstrate a size-selective quenching of the visible-range photoluminescence of CdSe nanocrystal quantum dots deposited on top of a chemically doped graphene layer and a theoretical model assuming charge transfer between the dots and graphene, which allows to understand these observations.

## Introduction

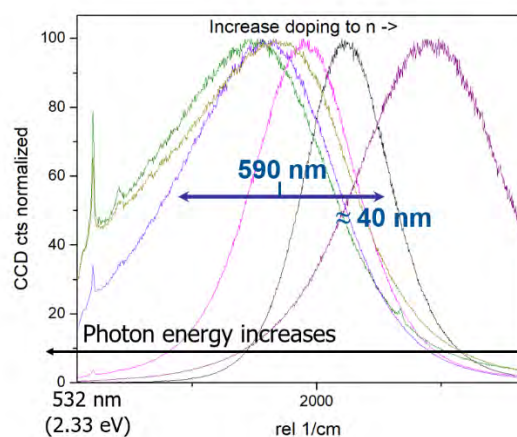
The transfer of energy from semiconductor Quantum Dots (QDs) to graphene, when these materials are combined in a hybrid structure, provides a rich environment to explore excitation dynamics in such a system and opens new possibilities in the field of Nanophotonics. The photo-physical properties of QDs can be predictably fine-tuned by size selection, and Graphene can also be doped, with the aim of producing well-defined conditions for photoexcitation and energy transfer. Additionally, both graphene and QDs display superior photo-stability. For these reasons, hybrid QD-graphene hybrid structures have strong potential for use in a wide variety of photonics applications where a well-defined modulation of optical and spectroscopic properties are crucial [1]. For example, several works have already demonstrated the use of graphene as a substrate to manipulate and quench photoluminescence (PL) [2] or to enhance resonant Raman signals [3].

Graphene, a monolayer-thin transparent conductor, has the advantage of electrically controllable frequency-dependent conductivity in the THz-to-mid-IR range. When an emitter is placed in the vicinity of a graphene layer, In addition to possible Ohmic losses and energy transfer to surface plasmons in graphene, there is an additional mechanism that may be named FRET to graphene. It consists in energy transfer to electron-hole pairs, symmetric with respect to the Dirac point, and scales with distance,  $h$ , as  $h^{-4}$ . Several research groups have demonstrated the possibility of control of the QD PL intensity by the gate voltage on graphene if the emitted photon energy,  $\hbar\omega_{\text{QD}}$ , is close to twice the graphene Fermi energy with respect to the Dirac point,  $2E_F$  [4].

Here we also explore changes in the PL spectra of point emitters (CdSe nanocrystal quantum dots) deposited on top of a graphene layer as the Fermi level of graphene is varied. The difference with the previous works is that these dots emit photons in the visible range, with  $\hbar\omega_{\text{QD}} > 2E_F$ . Yet, we found considerable changes in the PL spectrum, both in terms of the spectral shift and intensity, as the Fermi energy of graphene is changed by doping (see Figure 1). The work is devoted to the explanation and theoretical description of this effect.

## Experiment

CdSe colloidal quantum dots (QDs) were grown in a solution and then deposited on CVD-grown graphene layers with different  $E_F$  values owing to different levels of  $n$ -doping with hydrazine [7].



**Fig. 1.** PL spectra of CdSe QDs deposited on graphene layers with different levels of  $n$ -type doping. The excitation was performed with a laser at a resonant wavelength of 532 nm. Each spectrum is normalized to its own peak value. The PL band shifts to the right as the Fermi energy increases

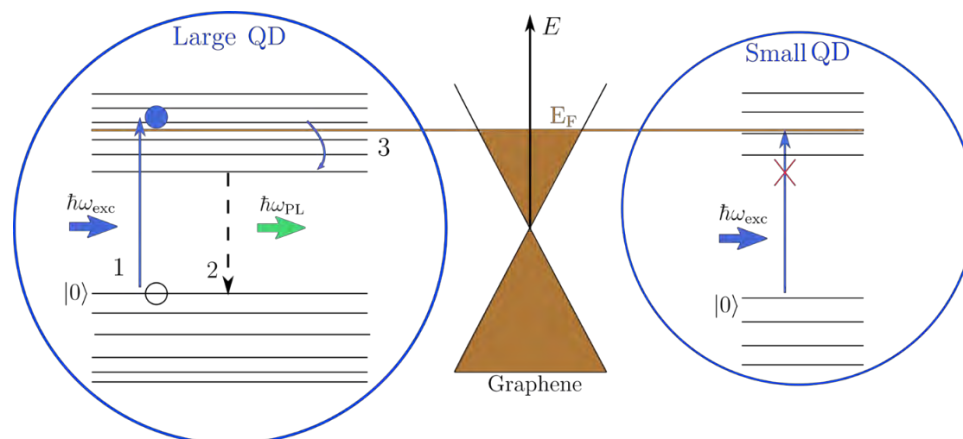
PL spectra of these QDs in solution (not shown) consisted of a band centred at 590 nm, broadened by the QD size dispersion. When they were deposited on the graphene layers, the PL intensity was partially quenched but the most remarkable effect consisted in the spectral shift of the emission band towards lower energies as the Fermi level of graphene increases (Figure 1, notice that the horizontal axis shows the Stokes shift with respect to the excitation, 532 nm). This emission band also becomes narrower with the  $n$ -doping of graphene induced by hydrazine molecules.

## Theory

First, we notice that for the QD photons of the energy over 2 eV, FRET to graphene is certainly possible because the condition  $\hbar\omega_{\text{QD}} > 2E_F$  is certainly fulfilled for any possible value of the Fermi energy, so this mechanism of doping-dependent changes in the PL spectra can be ruled out. Secondly, the work function of bulk CdSe is  $\approx 4.5$  eV [1], very close to that of pristine graphene, i.e. the conduction band bottom of bulk CdSe roughly matches the Dirac point in graphene. Based on these two facts, we assume that the selective quenching of the emission of some QDs within their size distribution underlies these observations.

Charge transfer from an excited QD to graphene via tunneling through the QDs shell, can be possible when there are available final states in graphene. Shifting of  $E_F$  by doping controls the available states, which might accept charge-transfer via tunnelling from a subset of size distribution present in the QD ensemble.

We calculated the tunneling rate and found that it is quite low, of the order of  $1 \text{ s}^{-1}$ , because of two factors: (i) the potential barrier (QD shell), and (ii) the mismatch between the electronic wavevectors in the QD (near the  $\Gamma$ -point) and graphene (near the Dirac point). Nevertheless, despite its slowness, the tunneling process makes it possible to exchange particles and energy between the QD and graphene, which results in the establishment of an equilibrium distribution in the system QDs + graphene. The concept of equilibrium, application of standard carrier statistics to the QDs-graphene system and the analysis of the electronic transitions in QDs of different sizes that remain allowed after the state filling by electrons coming from graphene allow us to explain the experimentally observed effect of PL emission control through the graphene doping level. Figure 2 explains the model, which was used in the calculations and describes, at least qualitatively, our experimental observations.



**Fig. 2.** Schematics of the model showing why smaller QDs are excluded from photoexcitation by the Pauli blocking. For larger QDs, the next (empty at equilibrium) levels have accessible energy values to be excited by an external photon

## References

1. A. L. Rogach (ed.), *Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots*, Springer-Verlag: Wien (2008).
2. Amal Kasry, Ali A. Ardakani, George S. Tulevski *et al.* // *J. Physical Chemistry C*, V. 116, 2858 (2012).
3. Na Zhang, Lianming Tong, and Jin Zhang // *Chemistry of Materials*, V. 28, 6426 (2016).
4. V. A. Burdov, M. I. Vasilevskiy // *Applied Sciences*, V. 11, 497 (2021).
5. Tingting Feng, Dan Xie, Dongxia Wanget *al.* // *Journal of Applied Physics*, V. 116, 224511 (2014).

# Oxidation of chlorosilanes in thin layers

I.I. Grinwald<sup>1,\*</sup>, R.V. Kapustin<sup>1</sup>, A.V. Vorotyntsev<sup>1</sup>, A.N. Petukhov<sup>1,3</sup>, V.I. Pryakhina<sup>2</sup>,  
I.V. Vorotyntsev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Minin str., 24, Nizhny Novgorod, 603950

<sup>2</sup> Yeltsin Ural Federal University, Mira street, 19, Yekaterinburg, 620002

<sup>3</sup> Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya square, 9, Moscow, 125047

\*grinwald@mts-nn.ru

The novel method of chlorosilanes' oxidation in thin layers by atmospheric air without hydrolysis and *in-situ* IR study of this process are presented. *Di*-, *tri*- and *tetra*-chlorosilanes encapsulated inside a silicon oxide film represent transient shapes of substances and combine gas and liquid phase states' properties. Presumably, they form intermolecular bonds with oxide film Si–O fragments. The IR data are confirmed by electron microscopy experiments.

## Introduction

Silicon oxide plays an important role in various technologies [1]. One of the suitable methods for its preparation is the oxidation of chlorosilanes. However, the direct chemical application of this compounds leads to an uncontrolled hydrolysis of the sample [2]. In the present work it was shown that thin layers forming on the surface represent the transient shapes of substances. Similar transformations seem to affect the reactivity [3].

Accordingly, we have studied *di*-, *tri*- and *tetra*-chlorosilanes by IR method to evaluate the possibility of their oxidation in thin layers without the hydrolysis. The spectral investigations were supported by electron microscopy experiments.

## Experimental

The following procedure was used to generate thin chlorosilanes' layers. Metal containers with substances, KBr optical windows, a window holder, and a Teflon 1-mm-thickness gasket were placed in the box filled by dried argon. The substance was put on the window surface under the gasket to prevent its falling into the spectral beam. Then the gasket was closed by another window, all items were clamped in the holder and consistently heated and cooled. The spectra were recorded by InfraSpec FSM 1202 and Shimadzu Affinity1 IR-Fourier spectrometers with a seven-day interval for a month. Sample morphology was characterised by scanning electron microscope Merlin Carl Zeiss (Germany) using secondary electron detector at 5–10 kV electron acceleration energy.

## Results and discussion

The formation of silicon dioxide film on the optical window surface confirms by the appearance of broad poly-component stretching Si–O band at 1075 cm<sup>-1</sup>. In the spectrum of *tetra*-chlorosilane recorded one day after the sample preparation, the bands at 620, 644 cm<sup>-1</sup> resembling gas phase bands were observed along with the band at 603 cm<sup>-1</sup> located close to the liquid phase band (Figure 1, spectrum 1). In the spectrum recorded after 7 days, the liquid band's intensity decreases while the gas phase band does not change essentially (Fig.1, sp.2). In the spectrum recorded after 21 days, only the gas phase band remains (Fig.1, sp.3), and in the spectrum recorded after 30 days, only the liquid phase band was revealed (Fig.1, sp.4). The images obtained by electron microscopy show the formation of SiO<sub>2</sub> film containing capsules with the initial substance (Fig.2).

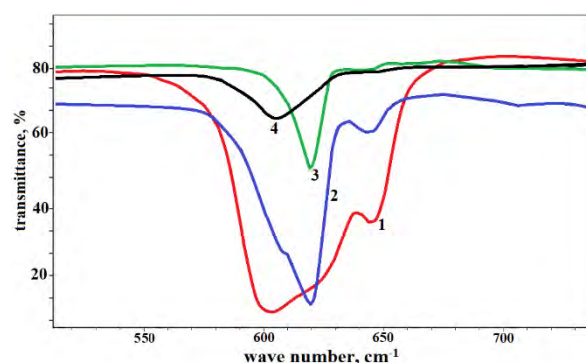
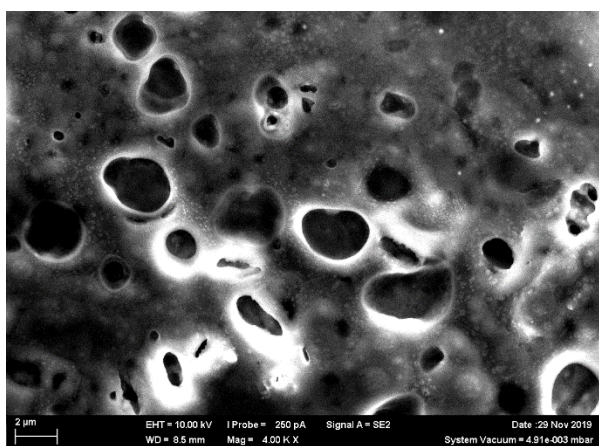


Fig. 1. *Tetra*-chlorosilane oxide film – IR spectra in the Si–Cl stretching region

In the spectra of *di*-chlorosilane, the considerable shift of Si–Cl bond stretching (to 717 cm<sup>-1</sup>) was detected.

These changes can be interpreted as a manifestation of the intermolecular interactions between *Cl* atom of chlorosilane and *Si* atom of oxide film. The bands of bending (H–Si–Cl) vibration in 800–900  $\text{cm}^{-1}$  region demonstrate the combination of gas and liquid properties and the same in-time changes as for Si–Cl stretching in  $\text{SiCl}_4$  spectra. The intensity of Si–O stretching bands in the oxide film spectra grows during the observation time. In this case, the microscopy images show the formation of  $\text{SiO}_2$  film containing small empty particles whereas the silane chloride is deposited inside the film. These results generally confirm the presented IR data interpretations.



**Fig. 2.** Electron microscopy image of  $\text{SiO}_2$  film prepared from *tetra*-chlorosilane

The main changes for *tri*-chlorosilane were revealed in the Si–H stretching region. A new multi-component band appears in the Si–H stretching region (2248–2256  $\text{cm}^{-1}$ ) region. It can be attributed to the stretching

of hydrogen bond arising due to the hydrogen atom transfer to Si–O–Si fragment of the oxide film.

Thereby, in all cases we have not fixed any bands which could be assigned to the hydrolysis products.

## Conclusion

The presented IR and electron microscopy data allows to make the following main conclusions.

1. Chlorosilanes, that are extremely sensitive to water vapor, become resistant to hydrolysis in the thin layers.
2. These layers form inside the silicon oxide films and persist for a long time at ambient conditions.
3. The transient shapes of substance, encapsulated in the film, combine liquid and gas phase properties.

## Acknowledgment

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Framework of the Basic Part of the State Task (theme FSWE-2020-0008 project 0728-2020-0008).

## References

1. S. Behr, S. Brinkmann-Chen, M. Garcia-Borrs *et al.* // *Angew. Chem. Int. Ed.*, V. 59, 15507 (2020).
2. Y. Xiao, Y. Wang, G. Luo *et al.* // *Chem. Eng. J.*, V. 283 (2016).
3. I. Grinvald, R. Kapustin // *J. Serb. Chem. Soc.*, V. 86, 1067 (2021).

# Photovoltaics of spatially modulated bilayer graphene: evidence of hydrodynamic regime

E. Mönch<sup>1</sup>, S.O. Potashin<sup>2</sup>, K. Lindner<sup>1</sup>, I. Yahniuk<sup>3</sup>, L.E. Golub<sup>2</sup>, V.Yu. Kachorovskii<sup>2,3,\*</sup>, V.V. Bel'kov<sup>2</sup>, R. Huber<sup>1</sup>, K. Watanabe<sup>4</sup>, T. Taniguchi<sup>5</sup>, J. Eroms<sup>1</sup>, D. Weiss<sup>1</sup>, and S.D. Ganichev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Terahertz Center, University of Regensburg, Regensburg, Germany, 93040.

<sup>2</sup>Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia, 194021.

<sup>3</sup>CENTERA, Institute of High Pressure Physics PAS, Warsaw, Poland, 01142.

<sup>4</sup>Research Center for Functional Materials, National Institute for Materials Science, 1-1 Namiki, Tsukuba, Japan, 305-0044.

<sup>5</sup>International Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science, 1-1 Namiki, Tsukuba, Japan, 305-0044.

\*kachor.valentin@gmail.com

We study in detail the ratchet effect in bilayer graphene, focusing on the frequency dependence of the ratchet current. We developed a theory which clearly demonstrates transition from drift-diffusion to hydrodynamic regime with increasing the electron-electron collision rate. The key result is qualitatively different frequency dependence of the ratchet current in two regimes: slow dependence,  $\omega^{-2}$ , in the drift-diffusion regime, and much stronger dependence,  $\omega^{-6}$ , in the hydrodynamic regime. We demonstrate that our theoretical predictions are in a very good agreement with experimental data.

## Introduction

Electronic fluid dynamics is one of the extremely actively developing areas of condensed matter physics. Although the pioneering works on hydrodynamic electron and phonon transport have been done a very long time ago, the topic did not generate much interest until recently. The interest on hydrodynamic transport was triggered by the fabrication of ultraclean ballistic structures, primarily based on one-dimensional and two-dimensional carbon materials. Convincing manifestations of hydrodynamic behavior in the different transport regimes have been demonstrated in a number of recent experiments. Moreover, literally in recent years, it was possible to experimentally visualize the hydrodynamic flow in ballistic 2D systems by using various nanoimaging techniques.

The purpose of the current work is to develop a theory which describes the transition from the hydrodynamic regime (HD), where electron-electron scattering prevails, to the drift-diffusion (DD) regime, where scattering by disorder dominates, and observe experimentally this transition by using a single system, on one and the same experimental sample, with a smooth change in some external control parameter. To solve this problem, we notice first that a number of promising additional opportunities appear when switching from dc to photo-response measurements. While so far dc transport measurements prevail we show here, both theoretically and experimentally, that photovoltaic measurements provide additional opportunities to explore the hydrodynamic regime.

As we show in this work, the frequency dependence of the response allows one to extract important information about the type of transport in the system. We demonstrate that the radiation frequency dependencies of the HD and DD responses are strikingly different.

We also find that the transition between the two regimes can be realized by changing the carrier density of the electronic system via gate voltage

In order to demonstrate experimentally DD-HD transition in photovoltaics, we choose one of the most general and fascinating phenomena in optoelectronics, which is the ratchet effect – the generation of a dc electric current in response to an ac electric field in systems with broken inversion symmetry. This general definition can be used for long periodic grating gate structures with an asymmetric configuration of gate electrodes, e.g. dual-grating top gate (DGG) structures. In this case, the direction of the current is controlled by the lateral asymmetry parameter

$$\Xi = \overline{|\mathbf{E}(x, t)|^2 \frac{dU(x)}{dx}},$$

where  $x$  is the coordinate in the direction perpendicular to grating, the overline stands for the average over the ratchet period and time,  $dU(x)/dx$  is the derivative of the electrostatic potential of the grating,  $U(x)$ , with respect to the coordinate, and  $E(x, t)$  is the radiation electric field being coordinate dependent due to the near-field diffraction.

The ratchet effect was treated theoretically and observed experimentally in various low dimensional structures. However, despite a large number of publications, the role of electron-electron collisions, which can drive the system into the hydrodynamic regime, has not been studied thoroughly. This is the central problem we address in this work.

In this paper, we demonstrate, both theoretically and experimentally, that the dc response of a DGG, based on bilayer graphene, has very different frequency dependencies:  $\omega^{-6}$  in the hydrodynamic regime and  $\omega^{-2}$



within the drift-diffusion approximation. We derive an analytical formula which describes the transition between the regimes. We demonstrate that this formula describes our experimental observations. We also find that at low carrier densities the experimental results follow the HD approach in agreement with theory. However, data obtained in the same sample after increasing the electron concentration in the channel via the back gate voltage are in line with a description in the drift-diffusion picture, which also agrees with developed theory. This suggests that we can tune between the two regimes.

We further find that decreasing a temperature towards sufficiently low temperatures, where the contribution of phonons is negligible, shifts the system closer to hydrodynamic regime.

## Methods

We start with kinetic equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \frac{\langle f \rangle_{\theta} - f}{\tau} + \frac{f_{\text{HD}} - f}{\tau_{ee}}$$

Here the electron-electron collision is described by a model collision integral  $(f_{\text{HD}} - f)/\tau_{ee}$ , where

$$f_{\text{HD}}(t, \mathbf{r}, \mathbf{v}) = \frac{1}{\exp \left[ \frac{m(\mathbf{v} - \mathbf{V}(\mathbf{r}, t))^2 / 2 - \mu(\mathbf{r}, t)}{T(\mathbf{r}, t)} \right] + 1}$$

is the hydrodynamic function described by several local parameters: temperature, averaged velocity and chemical potential. The field  $\mathbf{F}$ , entering kinetic equation is given by the sum of the field coming from static gate potential

$$U(x) = U_0 \cos qx, \quad q = \frac{2\pi}{L},$$

and the modulated field of the radiation

$$E_x = E_0 \cos \alpha \cos \omega t, \quad E_y = E_0 \sin \alpha \cos (\omega t + \theta)$$

Next, we multiply kinetic equation by 1,  $\mathbf{v}$  and  $v_i v_k$ , integrate over  $\mathbf{v}$  and solve the system of thus obtained equations perturbatively with respect to  $U_0$  and  $E_0$ , up to the order  $U_0 E_0^2$ .

## Results

For the case of the linear polarized radiation with the field direction perpendicular to the gating, calculation yields the following expression for dc current

$$\frac{J_{\text{dc},x}}{C_1} = \frac{\omega^2(\gamma^2 + \omega^2) + \omega_q^2[2\gamma(\gamma + \gamma_{ee}) - \omega^2]}{(\gamma + \gamma_{ee})(\gamma^2 + \omega^2)[\gamma^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_q^2)^2]}$$

where  $\omega_q$  is the plasma wave frequency,  $\gamma$  and  $\gamma_{ee}$  are the momentum relaxation rate and the rate of the electron-electron collisions, and coefficient  $C_1$  is proportional to the lateral asymmetry parameter. The results of the calculations are shown in the Fig. 1 together with experimental data. As seen, there is a good agreement with our experimental data.

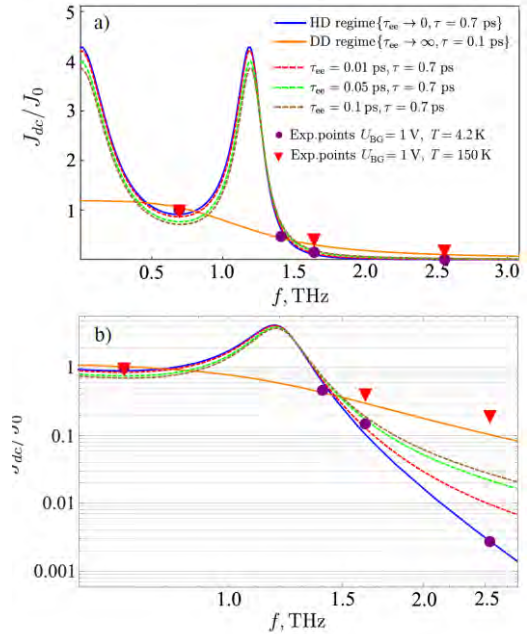


Fig. 1. Frequency dependence of current showing crossover from DD to HD regime with increasing  $\gamma_{ee}/\gamma$ , green dots and red triangles correspond to experimental data for the same value of the back gate voltage, but for different  $T$ : 4.2 K (green) and 150 K (red). Theoretical curves correspond to  $\tau = 0.1$  ps,  $\tau_{ee} = 900$  ps,  $f_q = 1.16$  THz (orange curve), and  $\tau = 0.7$  ps,  $\tau_{ee} = 0.001$  ps,  $f_q = 1.16\delta$  THz (blue curve)

## Conclusions

To conclude, we studied in detail the ratchet effect in bilayer graphene, focusing on the frequency dependence of the ratchet current. We developed a theory which clearly demonstrates transition from drift-diffusion to hydrodynamic regime with increasing electron-electron collision rate. The key result is the different frequency dependence of the ratchet current in two regimes. We demonstrate that our theoretical predictions are in a very good agreement with experimental data.

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-52-12019) and by the IRAP Program of the Foundation for Polish Science (grant MAB/2018/9, project CENTERA).

## Conclusions

To conclude, we studied in detail the ratchet effect in bilayer graphene, focusing on the frequency dependence of the ratchet current. We developed a theory which clearly demonstrates transition from drift-diffusion to hydrodynamic regime with increasing electron-electron collision rate. The key result is the different frequency dependence of the ratchet current in

two regimes. We demonstrate that our theoretical predictions are in a very good agreement with experimental data.

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-52-12019) and by the IRAP Program of the Foundation for Polish Science (grant MAB/2018/9, project CENTERA).



# Radiation Hardness of ALGAINP LEDs with Multiple Quantum Wells to Gamma-Quantum Irradiation

K.N. Orlova<sup>1</sup>, A.V. Simonova<sup>2</sup>, A.V. Gradoboev<sup>3, 4</sup>, F.F. Zhamaldinov<sup>3</sup>

1 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe hwy 31, Moscow, Russia, 115409.

2 Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety & M. Krasnoselskaya 2/8, b.5, Moscow, Russia, 115409.

3 Tomsk Polytechnic University & Lenina av. 30, Tomsk, Russia, 634050.

4 JSC "Scientific Research Institute of Semiconductor Devices", Tomsk, Krasnoarmeyskaya str., 99A, 634034.

\*KNOorlova@mephi.ru, [§ainakim297@yandex.ru](mailto:§ainakim297@yandex.ru), [§gava@tpu.ru](mailto:§gava@tpu.ru)

The paper presents the research results of watt-ampere and current voltage characteristics of LEDs based on AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells in the active region. The research is completed for LEDs (emission wavelengths 630 nm) under irradiation by fast neutron and gamma-quanta in passive powering mode. Watt-ampere characteristics region with the radiation dose is revealed. The limiting current  $I_{th}$  ab between areas with different electron injection levels doesn't match with the boundary between dependences in the current-voltage characteristics.

## Introduction

Light-emitting diodes (LEDs) based on AlGaInP heterostructures emits in the visible range of wavelengths. LEDs are increasingly used in electronic devices for various applications. It can be exposed to different radiation factors at operating conditions. These result in academic interest toward ionizing radiation effect on microelectronic articles. There is currently limited number of publications on the researching radiation resistance of AlGaInP LEDs [1-3]. Lack of sufficient information on the radiation resistance of LEDs cannot create their radiation model and solve the problem of forecasting resistance. Furthermore, the absence of the above information makes it difficult to effectively manufacture LEDs with a specified radiation hardness.

## Material and methods

AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells are produced by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD)-based gaseous epitaxy [4-5]. However, a set of technological problems in production of heterostructures has not been solved yet. These are the following: hydrogen passivation, timely oxygen removal from the case, decrease of imperfection on hetero-boundaries of layers and improvement of grown layer homogeneity.

These technological problems can cause high concentration of compounds (in particular Mg-H, Mg-O and

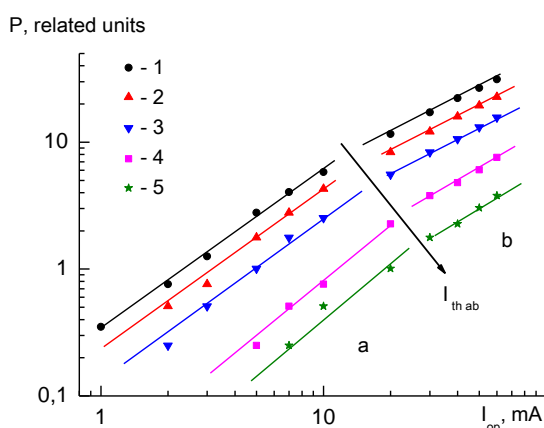
Te-O) in the layers of AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells [5], which are the centers of non-radiative recombination and/or absorption of active region-generated radiation. Aluminum in AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells can further generation of impurity compounds (Mg-O, Te-O) both in active and in barrier regions under ionizing irradiation, as the consequence, centers of non-radiative recombination and/or absorption of generated radiation grow [6]. The presented facts should be taken into consideration for studying radiation-induced defects in the heterostructures and devices made of them.

Quantum wells, introduced into the core of a heterostructure, facilitate concentration growth of minor charge carriers in it due to the state of two-dimensional electronic gas; it increases internal quantum efficiency [1]. Here, elastic strain relaxation on the layers boundary arising due to the inconsistency of lattice parameters with the introduction of quantum wells in the AlGaInP heterostructures active region doesn't lead to dislocations or point defects formation, which can be centers of non-radiative recombination.

The aim of this work is to investigate the AlGaInP LEDs parameters changes with a wavelength of 630 nm irradiated with gamma quanta  $^{60}\text{Co}$ . Research objects are LEDs based on AlGaInP of red color radiation. These optoelectronic products have got all main types of radiative recombination and usually applied for researching experiments.

## Results and Discussion

Before and after irradiation, the current-voltage and Watt-ampere LEDs characteristics were measured. The change of Watt-ampere characteristics during irradiation with gamma quanta is shown in Figure 1. It can distinguish the regions of high and average-level electron injection on Watt-ampere characteristics (areas a and b in Figure 1). In this case, the transition between high and average-level injection of electrons will correspond to the criterion parameter which is the boundary current at which achievement, a high electrons injection into the active region begins to predominate in the LEDs operating.



**Fig. 1.** Watt-ampere characteristics of ALGAINP LEDs: 1 -  $D_\gamma = 0$ ; 2 -  $D_\gamma = 5 \cdot 10^4$  Gy; 3 -  $D_\gamma = 5 \cdot 10^4$  Gy; 4 -  $D_\gamma = 5 \cdot 10^4$  Gy; 5 -  $D_\gamma = 5 \cdot 10^4$  Gy; a - average electron injection area of LEDs; b - high electron injection area of LEDs; the arrow shows the change in the current  $I_{th\ ab}$ , the value of which determines the position of the boundary a - b

It can be seen that two characteristic areas of electron injection into the LEDs active layer can be distinguished on the watt-ampere characteristics: a - the area of average injection and b - the area of high electron injection. The boundary between the selected injection regions can be characterized by the value of the boundary current  $I_{th\ ab}$ , as shown in Fig.1.

It should be particularly noted that the limiting current  $I_{th\ ab}$  between areas with different injection levels does not coincide with the boundary between dependences on the current-voltage characteristics. Moreover, the position of the boundary between selected injection areas in current-voltage characteristics does not change with increasing dose.

## Conclutions

The nature of the dependence of the change in the boundary current separating the regions isolated on the Watt-ampere characteristics region with the radiation dose is revealed. The limiting current  $I_{th\ ab}$  between areas with different electron injection levels doesn't match with the boundary between dependences in the current-voltage characteristics. Moreover, the position of the boundary between selected injection areas in current-voltage characteristics does not change with increasing dose.

## References

1. V. L. Mironov, O. L. Ermolaeva, E. V. Skorohodov *et al.* // *Physical Review B*, V. 85, 144418 (2012).
2. Градобоев А. В., Симонова А. В., Орлова К. Н. Информативность прямой ветви ВАХ приборов на основе рп-перехода // *Журнал радиоэлектроники*, (2019). – №. 1. – С. 7-7.
3. Градобоев А. В. и др. Имитация различных внешних воздействий на светодиоды схемным моделированием объемных каналов утечки тока // *Приборы и техника эксперимента*, (2021). – №. 5. – С. 90-99.
4. Corbett B. *et al.* 2003 *Proceedings of SPIE* **4876** pp 176-183 DOI: 10.1117/12.463713
5. Zeller H. R. 1995 *Solid-State Electronics* **38** 12 pp 2041-2046 DOI: 10.1016/0038-1101(95)00082-5
6. Sugawara H *et al* 1992 *Applied physics letters* **61** 15 pp 1775-1777 DOI: 10.1063/1.108423

# Graphene-based plasmonic metamaterial for terahertz laser transistors

T. Otsuji<sup>1,\*</sup>, S. Boubanga-Tombet<sup>1</sup>, A. Satou<sup>1</sup>, D. Yadav<sup>1</sup>, V. Ryzhii<sup>1,11</sup>, M. Ryzhii<sup>2</sup>, A.A. Dubinov<sup>3,§</sup>, V.V. Popov<sup>4</sup>, W. Knap<sup>1,5,6</sup>, V. Kachorovskii<sup>7</sup>, K. Narahara<sup>8</sup>, V. Mitin<sup>9</sup>, M.S. Shur<sup>10</sup>

1 Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, 9808577, Japan

2 Department of Computer Science and Engineering, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan

3 Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603950, Russia

4 Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Saratov Branch), Russian Academy of Sciences, Saratov 410019, Russia

5 CENTERA Laboratories, Institute of High Pressure Physics, Warsaw PAS 01142, Poland

6 Laboratory Charles Coulomb, University of Montpellier and CNRS, Montpellier F-34095, France

7 Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

8 Department of Electrical Engineering, University at Buffalo, SUNY, Buffalo, NY 14260, USA

9 Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180, USA

10 Department of Electrical and Electronic Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi 2430292, Japan

11 Mokerov Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics, RAS, Moscow 117105, Russia

\*otsuji@riec.tohoku.ac.jp, §sanya@ipm.sci-nnov.ru

This paper reviews recent advances in the research and development of graphene-based plasmonic metamaterials for terahertz (THz) laser transistors. The authors' theoretical discovery on THz laser transistors in 2007 was realized in 2018, demonstrating  $\sim 0.1 \mu\text{W}$  single-mode emission at 5.2 THz at 100K. To realize room-temperature, dry-cell-battery operating intense THz lasing, various approaches based on graphene plasmonic metamaterials are introduced as real device implementations.

## Introduction

Optical and/or injection pumping of graphene can induce negative-dynamic conductivity in the THz spectral range enabling new types of THz lasers [1-5]. The authors' theoretical discovery on THz laser transistors in 2007 was realized in a forward-biased graphene structure with a lateral p-i-n junction in a distributed-feedback dual-gate graphene-channel field-effect transistor (DFB-DG-GFET) and experimentally demonstrated a world-first  $\sim 0.1 \mu\text{W}$  single-mode emission at 5.2 THz and  $\sim 80 \mu\text{W}$  amplified spontaneous 1-7.6-THz emission, both at 100K in 2018 [5]. The relatively weak output intensities and relatively low lasing threshold temperature are major DFB-DG-GFET subjects to be improved. To realize room-temperature, dry-cell-battery operating intense THz lasing with fast direct modulation, various approaches based on graphene plasmonic metamaterials have been investigated and introduced as promising real device implementations.

## Review of DFB-DG-GFET THz Lasers

The fabricated DFB-DG-GFET is shown in Fig. 1 [5]. The channel consists of epitaxial graphene thermally decomposed on a C-face 4H-SiC substrate. A pair of toothbrush-shaped gate electrodes was patterned to form a

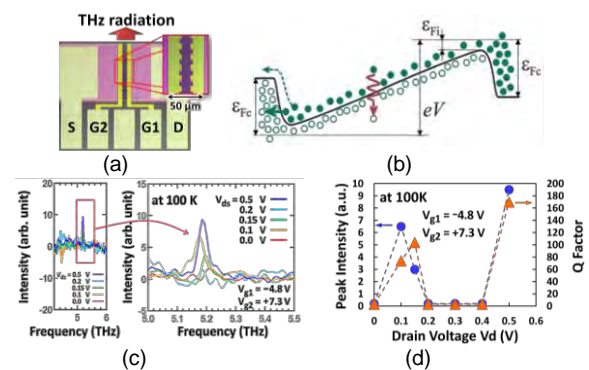
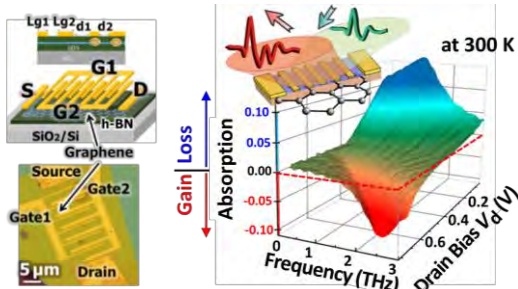


Fig. 1. DFB-DG-GFET [5]. (a) Top view. (b) Band diagram. (c) single-mode lasing at 100K. (d) Drain-bias dependency

DFB photonic laser cavity. Experimentally obtained single mode lasing frequency meets the fundamental mode of the DFB cavity. The maximal Q factor of the emission spectra agrees well with the simulated result. The substantial issues are relatively low threshold lasing temperature and very weak emission power of  $\sim 0.1 \mu\text{W}$  [5].

## Excitation of the Graphene Dirac Plasmon Polaritons

The maximum available gain via interband photon absorption and resulting carrier population inversion is limited to or below  $e^2/4\hbar$  (2.3%) per monolayer [1]. Excitation of GDP-polaritons (GDPPs) can enormously

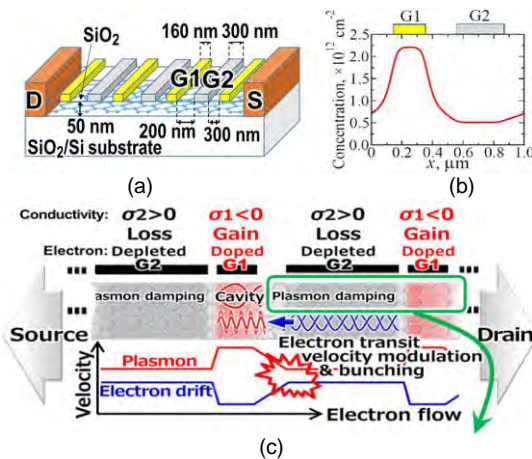


**Fig. 2.** THz amplification of stimulated emission via current-driven GDP instabilities in A-DGG-GFETs [6]

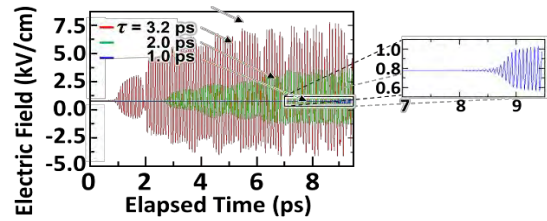
mediate the interaction between THz photons and graphene Dirac fermions (GDFs). We introduced an asymmetric dual-grating-gate GFET (A-DGG-GFET) structure to the THz gain and amplification in dc-current-driven metasurfaces promoting the GDP instabilities. We experimentally demonstrated an efficient tunable absorber, emitter, and amplifier operation with the maximum gain of 9% at room temperatures in A-DGG-GFETs with monolayer exfoliated graphene [6, 7] (see Fig. 2).

### Controlling the PT Symmetry of the GDP metasurfaces

In quantum mechanics, it was discovered that even non-Hermitian Hamiltonians can provide realistic solutions if the system preserves the parity and time-reversal (PT) symmetries [8]. The PT symmetry can be expressed by a pair of complementary gain and loss mediums, leading to a perfect transmission property (unidirectionality) [9]. We introduce active controlling of the PT symmetry to our original DGG-GFET structure by applied voltages [10]. When the GDPs in a DGG-GFET becomes unstable under forward-drain-biased, complementary



**Fig. 3.** (a) An A-DGG-GFET structure and (b) its periodic doping. (c) A possible scenario to promote the electron-transit-time-type GDP instability in the DGG-GFET metasurface [10]



**Fig. 4.** Simulated time evolution of GDP field activated by the dc-channel-current-driven PT symmetry turned on at  $t = 0$  ps reaching the self-oscillation at the GDP mode frequency in a picosecond time scale [10].  $\tau$  is the momentum relaxation time

DGG-biased conditions, the GDP metasurface is represented by a series connection of a unit cell of the instability-driven gain section and the carrier-depleted/transit loss section (Fig. 3). We numerically analyzed how fast the laser cavity Q values can be dynamically controllable in the DGG-GFET by using self-consistent simulation based on quasi-classical Boltzmann equation (Fig. 4) [10, 11]. When the instability-driven gain becomes balanced to the loss in the depleted region, the system becomes PT symmetric. Further increase of  $V_d$  makes the gain surpass the loss, resulting in THz self-oscillation of radiation emission. The important feature is its ultrafast transition speed within 10 ps duration. Even for rather moderate  $\tau$  value of 1 ps shows still fast transition to the stationary stage oscillation within 10 ps corresponding to the single-bit time slot for 100 Gbit/s data rate.

### Conclusions

We reviewed the recent advances and trends in the research and development of graphene-based plasmonic metamaterials for terahertz (THz) laser transistors. The graphene plasmonic metamaterial solutions presented here offer new ways for designing efficient devices for future robust THz plasmonic laser transistors.

The authors thank H. Fukidome, T. Suemitsu, T. Watanabe, O.V. Polischuk, D. V. Fateev, D.B. But, and I.V. Gorbenko for their contributions. This work was supported by JSPS KAKENHI (#21H04546, #20K20349, #16H06361, and #23000008), Japan.

### References

1. V. Ryzhii, M. Ryzhii, T. Otsuji // J. Appl. Phys. 101, 083114 (2007).
2. M. Ryzhii, V. Ryzhii // Jpn. J. Appl. Phys. (L) 46, 151-153 (2007).
3. V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, T. Otsuji // J. Appl. Phys. 110, 094503 (2011).

4. T. Otsuji *et al.* // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. 19, 8400209 (2013).
5. D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe *et al.* // Nanophoton. 7, 741–752 (2018).
6. S. Boubanga-Tombet, W. Knap, D. Yadav *et al.* // Phys. Rev. X 10, 031004 (2020).
7. S. Boubanga-Tombet, W. Knap, D. Yadav *et al.* // Frontiers in Phys. 7, 26806 (2021).
8. C.M. Bender, S. Boettcher // Phys. Rev. Lett. 80, 5243-5246 (1998).
9. H. Ramezani, T. Kottos // Phys. Rev. A 82, 04383 (2010).
10. T. Otsuji, S. Boubanga-Tombet, A. Satou *et al.* // Nanophoton. in press.
11. Y. Koseki *et al.* // Phys. Rev. B 93, 245408 (2016).

# Dynamical control of the giant resonant Goos–Hanchen shift in nonlinear dielectric nanostructures

A.A. Zharov<sup>1,\*</sup>, I.V. Shadrivov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for physics of microstructures RAS, GSP-105, Nizhny Novgorod, Russia, 603950.

<sup>2</sup> Nonlinear Physics Centre, Australian National University, Canberra, Australia.

\*zharov@ipmras.ru

We analyzed the Goos-Hanchen effect in a layered dielectric structure, which has the configuration of so-called photonic triode. It is shown that the value and sign of the giant Goos-Hanchen shift for the reflected and transmitted beams can be controlled by incident field intensity and/or incident pulse duration.

## Introduction

The Goos-Hanchen (GH) effect [1] refers to the appearance of the lateral shift of a reflected light beam with respect to the effective position of the specular reflection point. Optical GH effect was first observed experimentally [1] for the total internal reflection at a planar interface of two media, then, it was theoretically explained using Artmann’s stationary phase method [2]. In total internal reflection the GH shift is on the order of several wavelengths of the incident radiation. However, if there is a mechanism of energy transfer along the interface (e.g. when surface plasmon is excited by impinging a laser beam onto a metal/dielectric interface), the spatial shift of the reflected beam can be strongly enhanced, which is referred to as a ‘giant GH shift’ (see, for example, [3,4]).

## Results of calculation

In this study, we analyze the GH effect in a layered dielectric structure, which has the configuration of so-called photonic triode [5] (Fig.1). This structure provides effective energy transfer of light using resonant coupling between the incident light beam and high-quality-factor quasi-localized (leaky) eigenmode of a nonlinear planar dielectric waveguide. We develop an analytical approach to the calculation of the dynamical GH shift which is based on the master equation for slow amplitude of the mode excited by incident light. It allows us to relate reflected and transmitted fields to the incident radiation in a general case of nonlinear and non-stationary processes [5]:

$$\frac{1}{V_W} \frac{\partial E_W}{\partial t} + \frac{\partial E_W}{\partial x} + \gamma E_W + i(\Delta - \Delta^{NL})E_W = \sqrt{\gamma_r} g E_{inc} \quad (1)$$

$V_W$  is the group velocity of the guided mode,  $\Delta, \Delta^{NL} = \alpha |E_W|^2$  are the linear and nonlinear contributions to the mismatch between the propagation constant of incident and guided waves,  $\gamma = \gamma_r + \gamma_{Ohm}$  is determined by the radiation and Ohmic losses. Reflected and transmitted fields,  $E_{ref}$  and  $E_{tr}$ , as the functions of the incident and guided radiation can be found as follows [8]:

$$E_{ref} = R_0 E_{inc} + E_{tr}, E_{tr} = -\sqrt{\gamma_r} E_W / g \quad (2)$$

$R_0$  is the reflection coefficient from the half-space with cladding permittivity (Fig.1).

The examples of the spatio-temporal dynamics of the GH shift in linear and nonlinear cases are shown in Fig. 2, 3 respectively, where figures (a) correspond to the reflected radiation while (b) to the transmitted one.

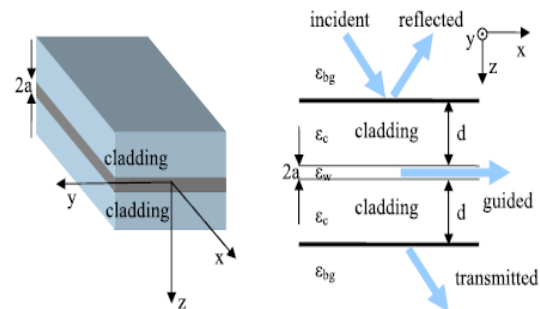
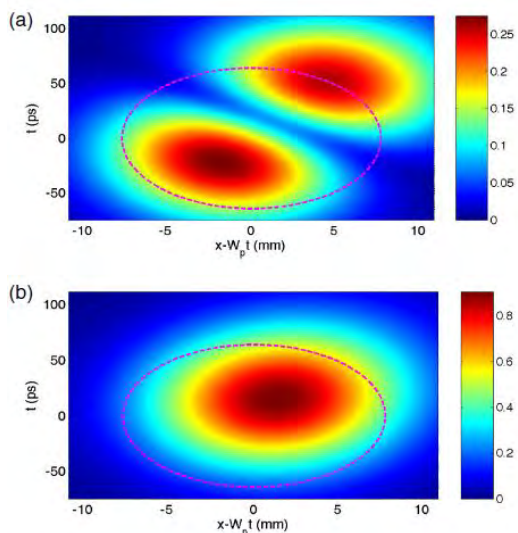


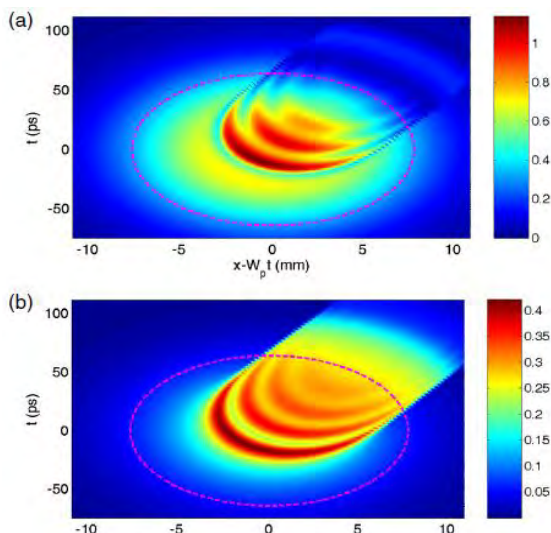
Fig. 1. Scheme of the structure under consideration

One should note that the sign of the GH shift depends on the ratio of group velocity and the velocity of light spot  $W_p$  along the waveguide  $W_p/V_W$ . In the Figs. 1,2  $W_p$  less than group velocity and the GH shift is positive.





**Fig. 2.** The spatio-temporal dynamics of the GH shift in linear case



**Fig. 3.** The spatio-temporal dynamics of the GH shift in nonlinear case

In the nonlinear regime (Fig. 3) the peak intensity of the incident pulse exceeds approximately bistability threshold in 2,65 times.

In conclusion, it is shown that the value and sign of the giant GH shift for the reflected and transmitted beams can be controlled by incident field intensity and/or incident pulse duration. These additional functionalities could be useful for applications.

Authors thank the support by Center of Excellence of Photonics funded by Ministry of Science and High Education of the Russian Federation (Contract no. 075-15-2020-906).

## Литература

1. F. Goos and H. Hanchen, // *Ann. Phys. (Leipzig)*, V. 436, 333 (1947).
2. K.V. Artmann, // *Ann. Phys. (Leipzig)*, V. 437, 87 (1948).
3. I.V. Shadrivov, A.A. Zharov, and Y.S. Kivshar, // *Appl. Phys. Lett.* V. 83, 2713 (2003).
4. V. Yablpragada, A. Ravishankar, G. Mulay, G. Agarwal, and V. Achanta, // *Sci. Rep.* V. 6, 19319 (2016).
5. A.A. Zharov, D.A. Smirnova, and A.I. Smirnov, // *J. Opt. Soc. Am. B*, V. 29, 443 (2012).

# Подавление формирования антифазных границ в GaP/GaAs/Si гетероструктурах

Д.С. Абрамкин<sup>1, 2, \*</sup>, М.О. Петрушков<sup>1</sup>, Е.А. Емельянов<sup>1</sup>, Д.Б. Богомолов<sup>1</sup>, М.А. Путятто<sup>1</sup>,  
А.К. Гутаковский<sup>1, 2</sup>, В.В. Преображенский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090.

\*dalamber.07@mail.ru

Предложен новый метод подавления формирования антифазных границ (АФГ) в слоях GaP, выращенных на Si подложках. Суть метода заключается в росте слоя GaAs на Si подложке, в котором происходит эффективное подавление образования АФГ, с последующим ростом слоя GaP на GaAs/Si. Микроскопические исследования GaP/GaAs/Si и GaP/Si гетероструктур, слои GaP в которых были выращены в идентичных условиях, показали практически полное подавление образования АФГ в GaP/GaAs/Si структурах. Обнаружено, что подавление АФГ ведёт к увеличению эффективности излучательной рекомбинации в гетероструктурах с GaAs/GaP квантовыми точками.

## Введение

Организация передачи данных по оптическому каналу позволит повысить эффективность работы вычислительных систем [1]. Решение этой задачи требует монолитной интеграции в кремниевые микросхемы эффективных полупроводниковых оптоэлектронных устройств, созданных на основе материалов A<sup>III</sup>-B<sup>V</sup>. Одной из перспективных платформ для A<sup>III</sup>-B<sup>V</sup>/Si интеграции является GaP/Si в виду низкого значения рассогласования параметров решётки (около 0.35%). Однако, несмотря на это, при росте GaP/Si буферных слоев выявляются проблемы, связанные с переходом от неполярного материала к полярному. Нарушение порядка следования атомов в GaP из-за наличия моноатомных ступеней на поверхности Si приводит к формированию протяжённых дефектов - антифазных границ (АФГ). Такие дефекты представляют собой области с высокой концентрацией точечных дефектов, которые существенно повышают темп безызлучательной рекомбинации и снижают эффективность работы оптоэлектронных приборов [2]. Распространённым способом борьбы с АФГ является использование Si подложек, поверхность которых отклонена от точной кристаллографической плоскости на 4-6° в направлении [110] [3]. При подготовке такой подложки к росту на ней формируется система двухатомных ступеней, что позволяет снизить плотность антифазных границ в GaP слое. К сожалению, реальные подложки кремния всегда имеют несовершенства, такие как: отклонение от плоскостности, всевозможные дефекты поверхности, отклонение направления разориентации от азимута [110]. В силу этих причин процесс форми-

рования двухатомных ступеней на реальной vicinalной подложке кремния не может быть доведен до полного завершения. Более того, как обсуждается в [4], АФГ в слоях GaP/Si могут возникать вследствие процессов замещения при осаждении начальных монослоёв GaP на Si, безотносительно структуры поверхности подложки Si.

Нами предложен новый подход для борьбы с образованием АФГ в GaP/Si структурах, заключающийся в росте промежуточного слоя GaAs/Si и последующем росте GaP на GaAs/Si.

## Рост гетероструктур

С целью повышения кристаллического совершенства промежуточный слой GaAs толщиной 600 нм был сформирован в три стадии: первые 200 нм выращивались при температуре 200°C, следующие 200 нм выращивались при 350°C, последние 200 нм GaAs выращивались при 580°C. Слой GaP толщиной 1130 нм был выращен в два этапа: первые 30 нм выращивались при температуре 230°C модифицированным методом эпитаксии с повышенной миграцией [5], последующие 1100 нм выращивались методом МЛЭ при температуре 580°C.

Оба типа гетероструктур были использованы для роста квантовых точек (КТ) GaAs. Формирование КТ проходило путём осаждения 3 монослоёв GaAs при температуре подложки 550°C.

После КТ были закрыты слоем GaP толщиной 50 нм, выращенном при той же температуре.



## Результаты

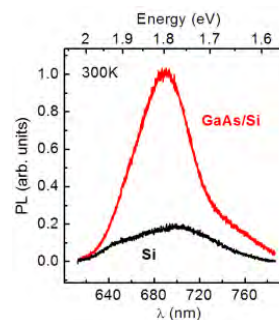
Темнопольные ПЭМ изображения GaP/Si гетероструктур, полученные в дифракционных рефлексах (002) и (00-2) представлены на рисунках 1 (а, б), соответственно. Области структуры, имеющие различный контраст, соответствуют различным фазам кристалла GaP. При смене дифракционного рефлекса, используемого при построении изображения, контраст картины инвертируется. Как видно из рисунка, несмотря на использование отклонённой подложки Si в структуре имеют место АФГ, т.е. действительно, применение отклонённых подложек не гарантирует полного отсутствия таких дефектов.



**Рис. 1.** Темнопольные ПЭМ изображения GaP/Si гетероструктуры, полученные в дифракционных рефлексах (002) и (00-2) (рис. (а) и (б), соответственно)

Темнопольные ПЭМ изображения GaP/GaAs/Si гетероструктур, полученные в дифракционных рефлексах (002) и (00-2) представлены на рисунках 1 (с, д), соответственно. Как видно из рисунка, контраст на изображениях, полученных при помощи различных дифракционных рефлексов практически полностью совпадает. Это указывает на полное подавление образования АФГ в таких структурах. К сожалению, рост GaP на GaAs приводит к появлению дополнительных упругих деформаций в слоях GaP, что ведёт к генерации большого числа пронизывающих дислокаций. Тем не менее, плотность дислокаций в таких структурах не превышает  $10^9$  см<sup>-2</sup> наблюдаемую в GaP/Si слоях.

Проведены измерения спектров стационарной фотолюминесценции (ФЛ) гетероструктур с GaAs/GaP КТ при комнатной температуре. Измерения проведены в нерезонансном режиме возбуждения носителей заряда в GaP матрице.



**Рис. 2.** Спектры стационарной ФЛ гетероструктур с GaAs/GaP КТ, выращенных на GaP/Si и GaP/GaAs/Si слоях. Измерения проведены при комнатной температуре

Результаты измерений представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка, в спектрах присутствуют полосы ФЛ, связанные с рекомбинацией носителей заряда в GaAs/GaP КТ [6]. При этом интегральная интенсивность ФЛ КТ, выращенных на GaP/GaAs/Si слоях более чем в 4 раза превосходит интегральную интенсивность ФЛ КТ, выращенных на GaP/Si слоях. Это указывает на заметное снижение концентрации точечных дефектов, выступающих в роли центров безызлучательной рекомбинации в приповерхностных GaP слоях.

## Заключение

Предложен новый метод подавления формирования АФГ в слоях GaP/Si. Метод заключается в выращивании промежуточных слоёв GaAs/Si с последующим ростом GaP на этих слоях. Микроскопические исследования показали практически полное подавление образования АФГ в GaP/GaAs/Si гетероструктурах. Применение GaP/GaAs/Si слоёв для роста светоизлучательных структур с GaAs/GaP КТ позволило заметно увеличить эффективность излучательной рекомбинации в КТ.

## Литература

1. Chen Sun, et al., Nature 528, 534 (2015).
2. M. Akiyama, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 23 L843 (1984).
3. Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков, УФН 178, 459 (2008).
4. М.А. Путято, и др., Изв. ВУЗов. Физика 53, 293 (2010).
5. Д.С. Абрамкин и др. ФТП 53, 1167 (2019).
6. D. S. Abramkin, et al., J. Appl. Phys. 112, 083713 (2012).

# Моделирование переходных процессов в транзисторных структурах для аналоговых и радиочастотных СБИС на структурах «кремний на изоляторе» с различными дозами имплантации водорода после воздействия импульсного гамма-излучения

Н.Д. Абросимова<sup>1</sup>, С.В. Оболенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603951

<sup>2</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603105

\*andnenastik@inbox.ru

Представлены результаты моделирования отклика и релаксации параметров МОП транзисторов с длиной канала 0,1 мкм, 0,35 мкм, 1 мкм на воздействие импульса и серии импульсов гамма-излучения на структурах «кремний на изоляторе» с различными дозами имплантации водорода.

Современные интегральные микросхемы в радиоэлектронной аппаратуре различного рода могут подвергаться воздействию импульса или серии импульсов ионизирующих излучений природного или техногенного происхождения, в результате чего частично или полностью теряют свои функциональные возможности. Выход из строя микросхемы может повлечь за собой отказ работы всего комплекса, в состав которого она входит. Поэтому задача гарантированного обеспечения радиационной стойкости ИМС является актуальной. Наиболее чувствительными к воздействию ИИ являются транзисторные структуры. Большинство аналоговых схем построены по структуре ИОУ (интегральный операционный усилитель), таким образом, на их примере можно выяснить влияние радиационных эффектов на характеристики аналоговых микросхем. Элементы ИС при определенных условиях могут обладать эффектом памяти, и при воздействии серии импульсов реакция на каждый последующий импульс будет отличаться от реакции на предыдущий. Это может существенно снизить время восстановления работоспособности и уровень бессбойной работы. В настоящее время эти эффекты недостаточно исследованы.

Несмотря на то, что интегральная схема на структурах «кремний на изоляторе» считаются достаточно стойкими к воздействию импульсных ионизирую-

щих излучений, остаточный водород в объеме диэлектрика и на границах с приборным слоем и подложками может оказывать влияние на характер ионизационных и релаксационных процессов в объеме окисла, на границе раздела окисел — кремний и в областях индуцированной инверсной проводимости кремния вблизи границы с диэлектриком [1-3].

Целью работы являлось моделирование релаксации параметров КНИ МОП транзисторов с длиной канала 0,1 мкм, 0,35 мкм, 1 мкм на структурах с различными дозами имплантации водорода.

Моделирование проводилось в программном комплексе Silvaco TCAD. Распределение полей, токов, концентрации носителей определяются системой уравнений (1)–(8):

$$\Delta V = q/\epsilon_- (n(F_n) - N_+(F_n) + N_-(F_n)) \quad (1)$$

$$\partial n(F_n)/\partial t = 1/q (\nabla, j) + G - R \quad (2)$$

$$j_n = -qnv(F_n) + q\nabla(D(F_n)n(F_n)) \quad (3)$$

$$j_w = -n(F_n)Wv(F_n) + \nabla(D(F_n)n(F_n)W) \quad (4)$$

$$j_t = j + \frac{\partial E}{\partial t} \quad (5)$$

$$E = -\nabla V \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \partial(W_n(F_n))/\partial t = & (\nabla, j_w) + (j, E) + GW_e - \\ & - n(F_n)(W - W_0)/\tau_w(F_n) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\partial m(W)v(F_n)/\partial t = -qE - m(W)/\tau_p(F_n)v(F_n) \quad (8)$$

где  $V$  – потенциал;  $n$  – концентрация электронов;  $N^+$ ,  $N^-$  – концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов);  $j$ ,  $j_i$  – плотность электронного и полного тока;  $j_w$  – плотность потока энергии электронов;  $W$ ,  $W_0$  – неравновесная и равновесная энергия электрона соответственно;  $\tau_w$  – время релаксации энергии;  $\tau_p$  – время релаксации импульса;  $m$  – эффективная масса электрона;  $D$  – коэффициент диффузии электронов;  $v$  – дрейфовая скорость электронов;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\epsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость;  $F_n$  – флюенс нейтронов;  $q$  – абсолютная величина заряда электрона;  $m$  – эффективная масса электронов;  $G$  – коэффициент генерации носителей заряда при воздействии излучения (учитывается только в момент действия ионизирующего излучения);  $R$  – коэффициент рекомбинации (для униполярных приборов учитывается в момент и непосредственно после действия ионизирующего излучения);  $We$  – средняя энергия генерируемого электрона (учитывается только в момент действия ионизирующего излучения). Для учета тока дырок в систему уравнений (1)–(8) добавляются аналогичные уравнения.

Для учета влияния ловушек на параметры генерации-рекомбинации носителей модель Шоккли-Рида-Холла модифицировалась следующим образом:

$$R = \sum_{\alpha=1}^l R_{n_\alpha} + \sum_{\beta=1}^m R_{n_\beta} \quad (9)$$

где  $l$  – количество донорных ловушек,  $m$  – количество акцепторных ловушек, а скорость рекомбинации  $R$  вычислялась как

$$R_{n,p} = (pn - n_{ie}^2) / [\tau_N \times \Delta 1 + \tau_p \times \Delta 2] \quad (10)$$

$$\Delta 1 = p + (1 / \text{Deg}F) \times n_{ie} \exp[(E_i - E. \text{Level}) / kT_L] \quad (11)$$

$$\Delta 2 = n + (1 / \text{Deg}F) \times n_{ie} \exp[(-E_i + E. \text{Level}) / kT_L] \quad (12)$$

В (11) и (12)  $\text{Deg}F$  – фактор вырождения,  $E. \text{Level}$  – уровень ловушки,  $T_L$  – температура решетки.

Времена жизни электронов и дырок обратно пропорциональны сечению захвата, тепловой скорости и плотности ловушек.

Получено, что пороговое напряжение МОП транзисторных структур слабо зависит от дозы имплантации водорода при формировании структур КНИ, зависимость электронной составляющей токов утечки немонотонно зависит от дозы имплантации водорода.

## Литература

1. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. Книга 2. М.: Техносфера, 2015. 488 с.
2. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization. John Wiley and Sons, 1990.
3. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.

# Влияние дозы имплантации водорода на релаксацию электрофизических характеристик структур «кремний на изоляторе» после воздействия рентгеновского излучения

Н.Д. Абросимова<sup>1,\*</sup>, П.А. Юнин<sup>3</sup>, М.Н. Дроздов<sup>3</sup>, С.В. Оболенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им.Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603951.

<sup>2</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603105.

<sup>3</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*andnenastik@inbox.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований релаксации электрофизических параметров структур КНИ с различной дозой имплантации водорода после воздействия стационарного рентгеновского излучения. Методы ВЧ ВФХ, псевдо-МДП транзистора позволили получить информацию о накопленном заряде, плотности поверхностных состояний, энергетических уровнях дефектов, концентрации и подвижности носителей. Примесный состав и профиль водорода определялись методом ВИМС, структурное совершенство слоев оценивалось с помощью методов XRR, XRD.

## Введение

Технология изготовления структур «кремний-на-изоляторе» – исторически первая коммерчески освоенная технология КНИ, специально предназначенная для обеспечения производства быстродействующих, а также радиационно-стойких ИС за счет значительного снижения паразитных емкостей и практически полного исключения токов утечки через подложку между соседними активными элементами ИС.

Технологии формирования структур КНИ с использованием водородного переноса и прямого сращивания имеют ряд преимуществ по отношению к другим методам:

-периоды кристаллических решеток соединяемых материалов могут не совпадать;

-возможность изготовления многослойных структур со сверхтонкими слоями

-возможность интеграции цифровых, аналоговых и радиочастотных элементов на одной пластине – системы в корпусе, системы на кристалле.

Имплантация водорода является одной из ключевых операций при формировании таких структур, во многом определяющей качество готовой структуры. Диапазон применяемых для расщепления доз со-

ставляет от  $3 \times 10^{16}$  до  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Толщина отщепляемого слоя может изменяться в диапазоне десятков нанометров, при этом расщепление может происходить не только по пику пробега атомов водорода, но и по пику имплантационных дефектов. Характер и плотность распределения имплантационных дефектов также зависят от дозы.

Принято считать, что финальный высокотемпературный отжиг удаляет весь водород и образованные им комплексы, однако измерения методом ВИМС показывают, что это не так.

Остаточный водород в структуре КНИ может пассивировать оборванные связи, модифицировать электрические свойства точечных дефектов, изменять их энергетические уровни, что может приводить к заметному изменению электрофизических характеристик вплоть до образования слоев инверсной проводимости.

Влияние дозы имплантации водорода на трансформацию примесно-дефектной системы структур КНИ при воздействии ионизирующих излучений может быть неоднородным и неоднозначным.

Целью работы являлось исследование влияния дозы имплантации водорода на релаксацию электрофизических характеристик структур «кремний на изоляторе» после воздействия рентгеновского излучения.

## Методика эксперимента

Структуры КНИ имели р-тип проводимости, водород имплантировался с дозами в диапазоне от  $4,5$  до  $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , толщина приборного слоя составляла порядка  $60 \text{ нм}$ , скрытого диэлектрика  $150 \text{ нм}$ .

Измерения электрофизических характеристик проводились методами ВЧ ВФХ, псевдо-МДП транзистора.

Структурное совершенство слоев структур КНИ оценивалось методами XRD, XRR.

Измерения профиля водорода проводились методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке TOF.SIMS-5 фирмы IONTOF с время-пролетным масс-анализатором. Концентрация водорода определялась в соответствии с методикой, изложенной в [1].

## Результаты и обсуждение

В исследуемых структурах КНИ, как видно из рисунка 1, зафиксировано наличие атомов углерода и SiN. Пики профилей расположены у поверхности приборного слоя и на границах скрытого диэлектрика и полупроводника, концентрация выше на границе с подложкой. Водород, как видно из рисунка 2, присутствует в скрытом диэлектрике, в большей степени на границе с подложкой. Различия в профилях водорода для структур с различной дозой имплантации заметно только у границы скрытого диэлектрика с приборным слоем.

Совместный анализ методами XRD и XRR показал наличие слоя с отличной от Si и SiO<sub>2</sub> плотностью на границе скрытого диэлектрика и подложки. На границе с приборным слоем изменения плотности не зафиксировано. Получено, что кристаллическое качество структуры 5 лучше, чем структуры 4.

Вольт-амперные характеристики структур КНИ, полученные методами псевдо-МДП транзистора, не имеют различий в области дырочного тока, но существенно отличаются в области электронной проводимости.

Зафиксирован различный характер релаксационной зависимости и время восстановления электрофизических параметров для структур КНИ с различной дозой имплантации водорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального Центра физики и математики

(ИЦФМ). Измерения были выполнены в лаборатории диагностики радиационных дефектов в твердотельных наноструктурах ИФМ РАН"

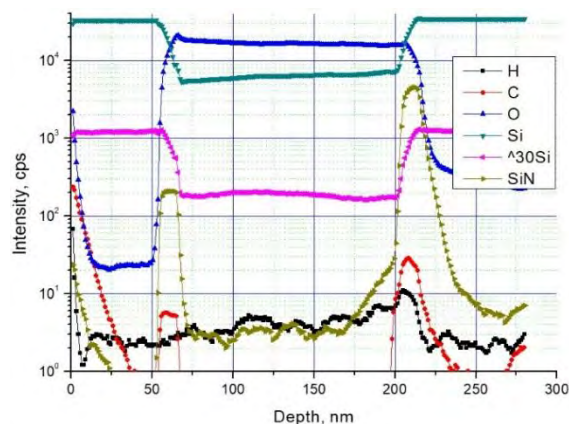


Рис. 1. Профили примесей по глубине структуры КНИ

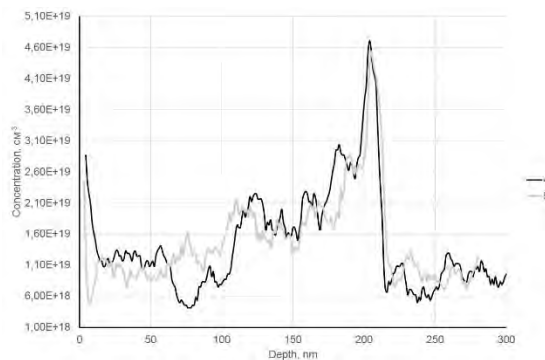


Рис. 2. Профили водорода по глубине структур КНИ с различной дозой имплантации водорода

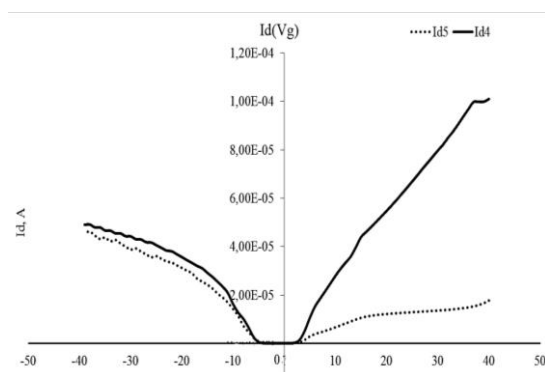


Рис. 3. Сток-затворные ВАХ структур КНИ с разными дозами имплантации водорода, полученные методом псевдо-МДП транзистора

## Литература

1. Н.Д. Абросимова, М.Н. Дроздов, С.В. Оболенский. // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – № 11. – С. 1850-1853.

# Молекулярно-пучковая эпитаксия и фотолюминесцентные свойства тонких пленок GaTe/GaAs

П.С. Авдиенко<sup>1,\*</sup>, И.В. Седова<sup>1</sup>, Д.Д. Фирсов<sup>2</sup>, О.С. Комков<sup>1,2</sup>, С.И. Трошков<sup>1</sup>, М.А. Яговкина<sup>1</sup>, С.В. Сорокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376.

\*pavdienko@ioffe.mail.ru

Тонкие пленки GaTe выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs(001). Установлена корреляция между условиями МПЭ и фазовым составом формируемых пленок. Приведены данные, позволяющие сделать выводы о природе широкой полосы излучения с  $E = 1,45$  эВ при  $T = 11$  К, которая доминирует в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) слоев GaTe/GaAs.

## Введение

Слоистые полупроводниковые соединения III–VI обладают уникальными электрическими и оптическими свойствами, необходимыми для разработки нового поколения высокоэффективных оптоэлектронных приборов. В частности, теллурид галлия (GaTe), будучи прямозонным полупроводником с  $E_g \approx 1,7$  эВ (300 К), является перспективным материалом для создания высокочувствительных фотоприемников и термоэлектрических устройств [1, 2]. В настоящей работе представлены исследования структурных и оптических свойств тонких пленок GaTe, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs(001) при использовании стандартных эффузионных ячеек Ga и Te в качестве источников молекулярных пучков.

## Результаты и обсуждение

Параметры МПЭ (температура роста  $T_S$ , соотношение эквивалентных давлений пучков  $P_{Te}/P_{Ga}$ ), а также средние скорости роста ( $R$ ) и толщины ( $d$ ) выращенных слоев GaTe/GaAs(001) представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры МПЭ GaTe/GaAs слоев

GaAs	Образец	$T_S$ , °C	Te/Ga (БЕР)	$R$ , нм/мин	$d$ , нм
(001)	S1	450	11	1,28	230
	S2	530	15	1,82	200
	S3*	520; 545	16	1,98	278
	S4	550	18	1,53	184

\*двухстадийный рост:  $T_{S1} = 520^\circ\text{C} - 80$  мин.;  $T_{S2} = 545^\circ\text{C} - 60$  мин.

Слой GaTe могут кристаллизоваться как в термодинамически стабильной моноклинной фазе ( $m$ ), так и метастабильной гексагональной фазе ( $h$ ), которая может переходить в  $m$ -GaTe при увеличении толщины и/или температуры. Кривые рентгеновской дифракции (РД) подтверждают сосуществование фаз  $h$ - и  $m$ -GaTe во всех выращенных слоях GaTe/GaAs(001) (Рис. 1(a)). При этом пик, связанный с  $h$ -GaTe ( $\sim 21,5^\circ$ ), практически отсутствует в слое GaTe, выращенном при  $T_S = 550^\circ\text{C}$ . Мы предполагаем, что наличие этого пика в кривых РД связано с существованием латеральных гетерофазных  $h/m$  гомопереходов в растущем слое [3].

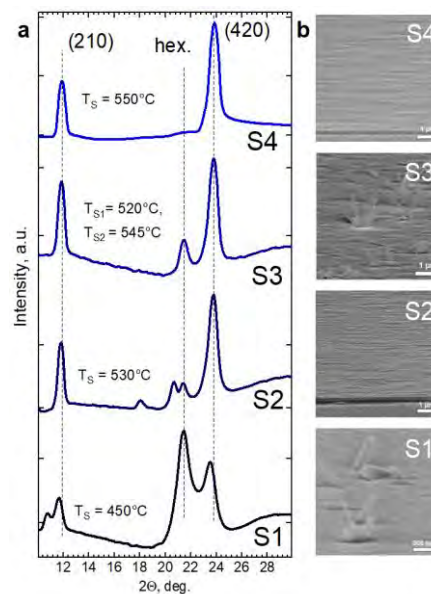
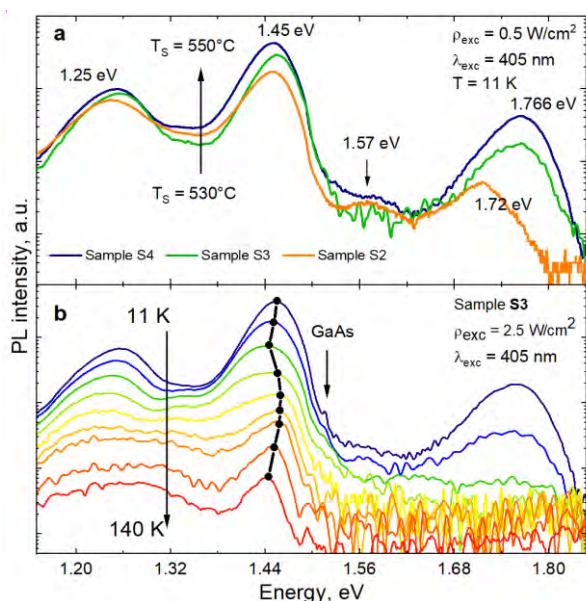


Рис. 1. (а) Кривые РД и (б) РЭМ изображения поверхности слоев GaTe/GaAs(001)



Изображения поверхности слоев GaTe/GaAs(001), полученные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на Рис. 1(b). Слои GaTe, выращенные при  $T_S > 520^\circ\text{C}$  (S2–S4), обладают заметной анизотропией рельефа поверхности, связанной с выравниванием направления [010] формируемого слоя *m*-GaTe вдоль направления [110] подложки GaAs(001) за счёт малого (менее 2%) эффективного рассогласования решеток между  $d_{(010)}^{m\text{-GaTe}}$  и  $d_{(110)}^{\text{GaAs}}$ . Наблюдаемая ориентация слоя *m*-GaTe только вдоль направления [110] подложки GaAs при отсутствии ориентации вдоль ортогонального направления [1-10] GaAs вызвана анизотропией атомной структуры поверхности подложки GaAs(001), формируемой перед началом эпитаксиального роста. При этом переход от изначальной реконструкции поверхности  $(2 \times 4)\text{As}$  к реконструкции  $(2 \times 1)$  определяется наличием фона Te (Se) в камере роста МПЭ. Относительно планарная поверхность слоя GaTe была получена при  $T_S = 550^\circ\text{C}$  и соотношении потоков Te/Ga = 18 (образец S4). Картины электронной дифракции из выделенной области (ЭДВО) образца S4 (не приведены здесь) подтверждают, что при используемых условиях МПЭ слой GaTe формируется в моноклинной фазе. Увеличение  $T_S$  также сопровождается снижением средней скорости осаждения GaTe при используемом потоке Ga, что связано с увеличением скорости десорбции GaTe с поверхности роста. При дальнейшем увеличении  $T_S > 560^\circ\text{C}$  при используемых потоках Ga и Te рост GaTe не наблюдался.



**Рис. 2.** (а) Спектры ФЛ слоев GaTe/GaAs(001), выращенных при различных  $T_S$ . (б) Температурная зависимость спектров ФЛ образца S3. Черными точками отмечены положения максимумов доминирующей полосы излучения

В спектрах фотолуминесценции (ФЛ) всех выращенных слоев GaTe/GaAs(001), измеренных при плотности мощности возбуждения  $\rho_{\text{exc}} = 0,5 - 2,5 \text{ Вт/см}^2$  ( $T = 11 \text{ К}$ ), наблюдаются четыре ярко выраженные полосы излучения, максимумы которых расположены при  $\sim 1,72 - 1,77 \text{ эВ}$ ,  $1,57 \text{ эВ}$ ,  $1,45 \text{ эВ}$  и  $1,25 \text{ эВ}$  (Рис. 2). Полоса излучения с  $E > 1,7 \text{ эВ}$ , расположенная вблизи края фундаментального поглощения *m*-GaTe, демонстрирует заметный коротковолновый сдвиг, а также увеличение интегральной интенсивности при увеличении  $T_S$  слоев GaTe (Рис. 2(a)). Слабая широкая полоса с  $E = 1,57 \text{ эВ}$  в спектрах ФЛ связана с рекомбинацией донорно-акцепторных пар в GaTe [2,3], в то время как полоса с  $E = 1,25 \text{ эВ}$ , по-видимому, соответствует излучению вакансионных комплексов в GaAs [3]. При этом сам пик ФЛ от подложки GaAs отчетливо наблюдается на коротковолновой стороне широкой полосы излучения с максимумом  $E = 1,45 \text{ эВ}$  ( $\rho_{\text{exc}} = 2,5 \text{ Вт/см}^2$ ,  $T = 11 \text{ К}$ ) (см. Рис. 2(b)), которую в работе [2] связали с около-краевым излучением из *h*-GaTe. Тем не менее, сопоставление данных РД и ФЛ подтверждает отсутствие корреляции между интенсивностью ФЛ ( $I_{PL}$ ) полосы с  $E = 1,45 \text{ эВ}$  и содержанием фазы *h*-GaTe в исследуемых образцах. Более того, спектры ФЛ образца S3, измеренные в диапазоне  $T = 11 - 140 \text{ К}$  (Рис. 2(b)), показывают, что  $I_{PL}$  полосы, связанной с излучением связанных экситонов в *m*-GaTe, быстро падает и полностью исчезает при  $T > 60 \text{ К}$ , в то время как температурная зависимость энергетического положения максимума полосы с  $E = 1,45 \text{ эВ}$  ( $T = 11 \text{ К}$ ) носит немонотонный «S-образный» характер, характерный для состояний, связанных с дефектами. Учитывая возможность образования латеральных гетерофазных *h/m* гомопереходов в слое GaTe, мы полагаем, что полоса излучения с  $E \approx 1,45 \text{ эВ}$ , доминирующая в спектрах ФЛ тонких пленок GaTe/GaAs, связана с излучением эмиссионных центров, локализованных на краях отдельных доменов.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-32-90178.

## Литература

1. X. Yuan *et al.* // Nano Res. 8, 3332–41 (2015).
2. S.H. Huynh *et al.* // ACS Appl. Nano Mater. 4, 8913–21 (2021).
3. S. Sorokin *et al.* // Materials 13, 3447 (2020).

# Уменьшение вклада от АМР эффекта при детектировании спиновых токов в структурах на основе кремния: $\text{P}_y/\text{Si}:\text{Bi}:\text{P}$

Н.И. Аверина<sup>1</sup>, А.А. Ежевский<sup>1</sup>, Д.В. Гусейнов<sup>1</sup>, А.В. Сухоруков<sup>1</sup>, А.В. Новиков<sup>2</sup>, Д.В. Юрасов<sup>2</sup>, Н.С. Гусев<sup>2</sup>, И.А. Зубанов<sup>1</sup>, Е.А. Калинина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950.

\*nataliya.averina28@mail.ru

При генерации спинового тока в n-Si методом спиновой накачки и детектирования с использованием инверсного спинового эффекта Холла возникает сигнал АМР эффекта, величину которого можно существенно уменьшить за счёт использования плёнки пермаллоя, разрезанной поперёк линий тока.

## Введение

В настоящее время активно развивается полупроводниковая спинтроника. Интерес к ней вызван преимуществами спинового тока перед зарядовым. Высокое быстродействие устройств спинтроники может быть достигнуто благодаря тому, что не обязательно перемещать в пространстве заряд и связанную с ним массу. Для управления и обнаружения спинового тока представляет экспериментальный и теоретический интерес спиновый эффект Холла и обратный спиновый эффект Холла. Эффективность преобразований характеризуется углом спин-Холла, являющимся важным параметром для интеграции технологий спинового тока в электронные технологии, основанные на зарядовом токе.

## Методика эксперимента

Исследование инверсного спинового эффекта Холла и АМР проводилось на образцах кремния, легированного висмутом и фосфором  $\text{P}_y/\text{Si}:\text{Bi}:\text{P}$ , полученных по методике, описанной в [1].

Методом МЛЭ на подложку КНИ наносился нелегированный слой Si толщиной 500 нм, легирование которого донорами Bi и P осуществлялось методом ионной имплантации.

Методом взрывной литографии и магнетронного распыления наносились омические контакты Au/Ti и сплошной и разрезанный слой  $\text{P}_y$  толщиной 10 нм.

Линии ФМР в слое пермаллоя возбуждались с помощью спектрометра электронного парамагнитного резонанса Bruker\_EMX-plus-10/12, работающего на

микроволновой (MW) частоте 9.4 ГГц. Измерения проводились при комнатной температуре.

При исследовании ИСХЭ снимались угловые зависимости измеряемого напряжения от положения вектора магнитного поля в плоскости структуры. Напылённая плёнка пермаллоя разрезалась поперёк линий тока.

## Результаты и их обсуждение

Кремний обладает слабым спин-орбитальным взаимодействием (СОВ), благодаря чему ему свойственны большие времена спиновой релаксации. Для генерации спиновых токов в кремнии, мы модифицировали его СОВ путем введения висмута.

Bi является тяжёлым донором. Он вносит большой спин-орбитальный потенциал, на котором рассеиваются спины носителей. При большой концентрации висмута длина спиновой диффузии мала [2] и спиновый ток может быстро затухнуть, поэтому кремний легировали висмутом до концентрации порядка  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Фосфор так же обладает слабым СОВ, поэтому его роль – обеспечить структуру кремния металлической проводимостью для усиления спиновой накачки. Концентрация фосфора в кремнии  $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

При детектировании сигнала напряжения помимо ИСХЭ необходимо было учесть эффект анизотропного магнитосопротивления (АМР) в пермаллое, вносящий вклад в измеряемый сигнал. Этот эффект также известен под названием – планарный эффект Холла.



Для уменьшения сигнала АМР слой пермаллоя разрезался на 10 полосок шириной 150 мкм, расстояние между которыми составляло 15 мкм (Рис. 1).



Рис. 1. Изображение разрезанного слоя пермаллоя

Расчёт вклада сигнала АМР для случая, когда пермаллой  $R_{py}$  разрезался поперек линий тока, проводился с использованием метода контурных токов при значений сопротивлений, которые посчитаны по приведённым ранее параметрам структуры [1]:  $R_{py}$  – сопротивление полоски пермаллоя,  $R(\text{Si:Bi:P})$  – сопротивление легированного слоя кремния,  $R'_c$  и  $R_c$  – контактные сопротивления, связанные с контактом пермаллоя и кремния.

На рис.2 представлена эквивалентная схема такой структуры:

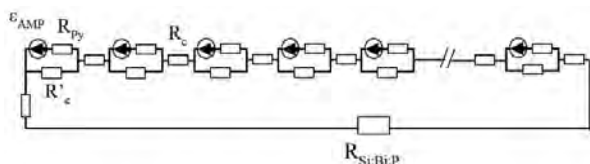


Рис. 2. Эквивалентная схема структуры со слоем пермаллоя, разрезанным поперек линий тока

Каждой полоске пермаллоя соответствует источник ЭДС, возникающей за счет эффекта АМР, сопротивление пермаллоя и шунтирующее контактное сопротивление. 10 таких цепочек соединены последовательно. Между ними имеется контактное сопротивление полосок пермаллоя, на котором в основном падает всё напряжение. С помощью характеристического графа измерено сопротивление между крайними полосками пермаллоя, равное 200 Ом. Контактное сопротивление  $R_c$  в таком случае принимается примерно равным 20 Ом. 10 последовательных цепочек параллельно подсоединены к сопротивлению кремния 100 Ом.

Из проведённых расчётов следует, что при разрезании пермаллоя поперёк линий тока на 10 полосок сигнал АМР уменьшается примерно в 12 раз.

На рис.3 представлена угловая зависимость напряжения ИСХЭ.

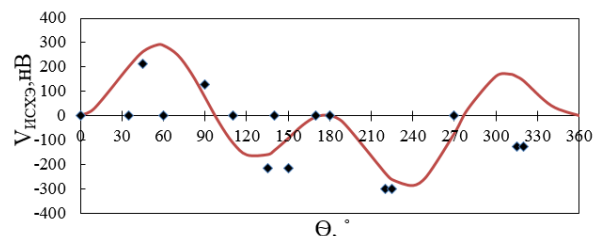


Рис. 3. Экспериментальная (точки) и рассчитанная (сплошная линия) зависимости сигнала ИСХЭ в структуре с разрезанным слоем пермаллоя

Поскольку вкладом от АМР эффекта теперь можно пренебречь, то теоретическая зависимость сигнала ИСХЭ на рис.3 построена из соображений, что в слое кремния возможны не только междолинные переходы электронов, но существует конечная вероятность переходов электронов внутри долин кремния. Часть сигнала ИСХЭ, обусловленная внутримолиновыми переходами электронов, будет пропорционален  $\sin\theta$ . Тогда весь сигнал ИСХЭ пропорционален  $(a \cdot \sin\theta + b \cdot \sin\theta \cdot \sin 2\theta)$ . Переходы в одной долине по расчётам дают меньший вклад в сигнал, чем переходы между долинами.

## Литература

1. A. A. Ezhevskii, D. V. Guseinov, A. V. Soukhovukov, A. V. Novikov, D. V. Yurasov, and N. S. Gusev. Spin pump induced inverse spin Hall effect observed in Bi-doped n-type Si. *Phys. Rev. B* 101, 195202 (2020).
2. A. A. Ezhevskii, D. V. Guseinov, A. V. Soukhovukov, *et al.* // *Semiconductors*, 2021, Vol. 55, No. 8, pp. 877–881.
3. Tetlow H. Semiconductor spintronics: Tuning the spin Hall effect in Si / H. Tetlow, M. Gradhand// *Phys. Rev. B* 87, 075206 (2013).
4. E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, *Appl. Phys. Lett.* 88, 182509 (2006).

# Динамическая поляризация ядер в полупроводниках в условиях терагерцового излучения

Н.С. Аверкиев<sup>1, \*</sup>, М.Б. Лифшиц<sup>1, §</sup>, D. But<sup>2</sup>, G. Martinez<sup>3</sup>, W. Knap<sup>2, 4</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Политехническая ул. 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> CENTERA Laboratories, Institute of High Pressure Physics PAS, Warsaw 01-142, Poland.

<sup>3</sup> Grenoble High Magnetic Field Laboratory, Grenoble, Cedex 9, France.

<sup>4</sup> Laboratory Charles Coulomb, University of Montpellier and CNRS, Montpellier F-34095, France

\*averkiev@les.ioffe.ru, §marli@mail.ru

Зарегистрирована большая степень неравновесной спиновой поляризации ядер фосфора в Si при относительно слабых уровнях накачки в сверхсильных магнитных полях и низких температурах. На основе кинетических уравнений для заселенностей уровней проанализированы зависимость степени поляризации от уровней накачки, величины магнитного поля и температуры. Показано, что за процессы спиновой и кросс-релаксации отвечают однофоновые процессы, и время спиновой релаксации много короче времени кросс-релаксации

Теоретически и экспериментально исследованы особенности динамической ядерной поляризации в широком диапазоне высоких частот (вплоть до 0,5 ТГц) и сильных магнитных полях (до 16Т) в условиях электронного спинового резонанса для мелких доноров фосфора в кремнии. Эксперименты проводились на образцах Si: P с концентрацией доноров от  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В качестве источника терагерцового излучения с частотами 0,25, 0,3, 0,35 и 0,43 ТГц использовался газовый лазер дальнего инфракрасного диапазона. Неравновесная стационарная поляризация ядер возникает из-за сверхтонкого взаимодействия спинов электрона и ядра примеси, и возможна при ненулевой вероятности переходов с одновременным переворотом спина электрона и ядра. Неравновесная степень ядерной поляризации превосходит равновесную на много порядков, поскольку последняя незначительна из-за малой величины расщепления спиновых уровней ядра во внешнем магнитном поле. Время установления термодинамического равновесия в изолированной от электрона ядерной системе предполагается самым длинным. Спин ядра фосфора и спин электрона, локализованного на доноре равны 1/2, это позволяет получить относительно простую систему кинетических уравнений для заселенностей четырех уровней. Низкие температуры, используемые в экспериментах означают, что заселенности электронных спиновых подуровней различаются значительно и в этих условиях высокая степень ядерная поляризация возможна при относительно слабых уровнях накачки.

Нами показано, что экспериментально наблюдаемые постоянные времена ядерной поляризации всегда отличаются от времен кросс-релаксации и зависят от мощности накачки, а в случае эффекта Оверхаузера (резонанс полностью насыщен) экспериментально определенные постоянные времена в два раза больше, а конечная поляризация ядер в два раза меньше, чем считалось ранее. Использование сильных магнитных полей означает, что резонансная частота основных переходов попадает в терагерцовую область частот. Это позволило установить, что время кросс-релаксации не зависит от температуры в широком интервале вплоть до 5К и время спиновой релаксации на много порядков короче времени кросс-релаксации. Это означает, что основным механизмом спиновой релаксации и кросс-релаксации является однофоновые процессы, эффективность кросс-релаксации подавлена за счет малости отношения величины сверхтонкого расщепления к спиновому расщеплению в магнитном поле. Микроскопической причиной переходов с переворотом спина является модуляция g-фактора электрона равновесными акустическими фононами, поскольку это позволяет описать температурную и полевою зависимость времени кросс-релаксации. Установлено, что время кросс-релаксации лежит в интервале от 10 до 1000 сек в зависимости от величины магнитного поля. Показано, что все скорости спиновой релаксации в условиях терагерцовых частот (сильные магнитные поля) для доноров в Si могут быть описаны одной зависимой от типа донора константой.

# Пространственно-временная динамика свободных и связанных экситонов в монослоях MoS<sub>2</sub>

М.А. Акмаев<sup>1\*</sup>, М.М. Глазов<sup>2</sup>, М.В. Кочиев<sup>1</sup>, П.В. Винокуров<sup>3</sup>,  
С.А. Смагулова<sup>3</sup>, В.В. Белых<sup>1,§</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект, 53, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>3</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, ул. Беллинского, 58, Якутск, 677000.

\*akmaevma@lebedev.ru, §belykh@lebedev.ru

Исследована спектрально- и пространственно-временная динамика фотолюминесценции монослоев MoS<sub>2</sub>. Помимо линии свободных А-экситонов обнаружена низкоэнергетическая линия, приписываемая линии связанных экситонов, которая доминирует при низких температурах. Данная линия испытывает сильный красный сдвиг при увеличении температуры и имеет субмикросекундную временную динамику. Для свободных А-экситонов, изучая пространственно-временную динамику, обнаружен диффузионный характер пространственного распространения экситонов с коэффициентом диффузии достигающим 40 см<sup>2</sup>/с. Для связанных экситонов наблюдается распространение, которое достигает десятков микрометров и имеет субдиффузионный характер. Для объяснения данного результата предложена модель на основе совместного действия диффузии и Оже-рекомбинации экситонов.

## Введение

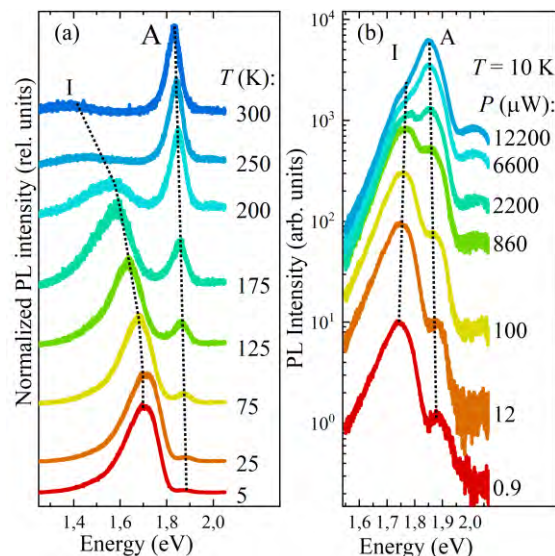
В атомарно-тонких слоях дихалькогенидов переходных металлов (ДХПМ) экситонные линии в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) доминируют даже при комнатной температуре, что стимулирует интенсивное изучение экситонной физики в этих структурах [1]. При низких температурах большую роль начинает играть неоднородный профиль потенциала, который чувствуют экситоны. В результате этого в спектрах ФЛ могут начать доминировать связанные экситоны [2]. Несмотря на активное изучение связанных экситонов, их динамика ФЛ, а в особенности пространственно-временная динамика, все еще плохо изучена.

## Методика эксперимента

Монослои MoS<sub>2</sub> были выращены на кремниевой подложке с помощью химического осаждения из газовой фазы [3]. Основными методами исследования монослоев MoS<sub>2</sub> были стационарная и разрешенная по времени микро ФЛ в интервале температур 5 – 300 К. Лазерное излучение фокусировалось с помощью микрообъектива на образце в пятно диаметром ~ 3 мкм. При исследованиях стационарной ФЛ возбуждение производилось излучением (457 нм) полупроводникового непрерывного лазера. Спектры ФЛ регистрировались с помощью спектрометра с Si-CCD матрицей. При измерениях разрешенной во времени ФЛ использовалась вторая гармоника (400

нм) излучения импульсного (2 пс) титан-сапфирового лазера на частоте 76 МГц. При измерениях динамики в широком временном диапазоне частота повторения лазерных импульсов уменьшалась с помощью селектора импульсов. Регистрация проводилась с помощью стрик-камеры, сопряженной со спектрометром с разрешением до 5 пс.

## Результаты



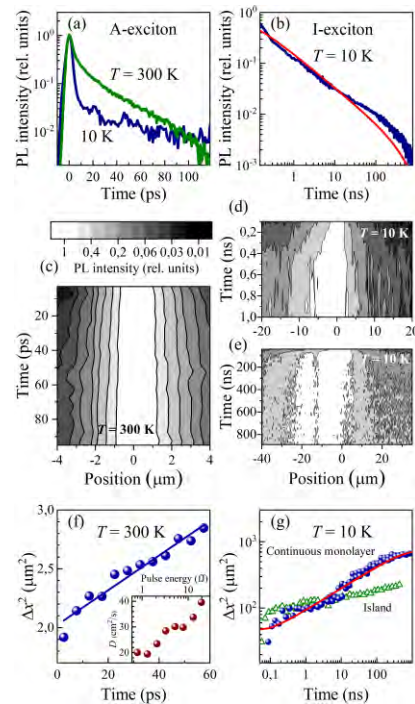
**Рис. 1.** Спектры ФЛ монослоя MoS<sub>2</sub>. «А» обозначает прямой А-экситон. «I» - связанный экситон. (а) Зависимость спектров ФЛ от температуры. (б) Зависимость спектров ФЛ от мощности возбуждения при температуре 10 К [2]

На рис. 1 (а) показаны спектры ФЛ монослоя MoS<sub>2</sub> в зависимости от температуры. При комнатной температуре наблюдается линия от прямого А-экситона. При уменьшении температуры появляется низкоэнергетическая линия (I на рис. 1), которую мы приписываем линии связанных экситонов. При низких температурах она доминирует, а при увеличении температуры отношение интенсивностей I-экситонов к А-экситонам уменьшается. К тому же линия I-экситонов испытывает сильный красный сдвиг по сравнению с линией А-экситонов. Это может быть связано с термической активацией локализованных экситонов и их последующим захватом в более низкие энергетические состояния.

На рис. 1 (b) показаны спектры ФЛ в зависимости от мощности накачки при температуре 10 К. Интенсивность ФЛ от линии I-экситонов имеет сублинейную зависимость от мощности, в то время как линия А-экситонов имеет линейную зависимость. В результате при высокой мощности накачки в спектрах ФЛ начинает доминировать линия А-экситонов. К тому же при увеличении мощности накачки линия А-экситонов испытывает красный сдвиг, в то время как линия I-экситонов – синий сдвиг. Это может быть вызвано тем, что I-экситоны локализованы в ловушках, которые имеют несколько энергетических уровней. При увеличении мощности заполняются верхние уровни и, как следствие этого, энергетическое положение линии увеличивается. Все эти факты говорят о том, что низкоэнергетическая линия I-экситонов вызвана рекомбинацией связанных экситонов.

Далее мы изучали динамику ФЛ монослоев MoS<sub>2</sub>. На коротком временном интервале (~100 пс) доминирует динамика от А-экситона, как при высокой, так и при низкой температуре (рис. 2 (а)). При низкой температуре видна динамика от связанных экситонов (рис. 2 (b)), которая наблюдается на временах до ~1 мкс, и имеет неэкспоненциальный характер.

На рис. 2 (c)-(e) показана пространственно-временная динамика ФЛ. Для А-экситонов пространственно-временная динамика наблюдается только при высокой температуре. Разбегание А-экситонов имеет диффузионный характер, с коэффициентом диффузии  $D$ , который увеличивается при увеличении мощности накачки (рис. 2 (f)). При низких температурах диффузия сильно подавлена и не может быть нами зарегистрирована.



**Рис. 2.** (а) Динамика ФЛ монослоя MoS<sub>2</sub> в коротком временном интервале. Наблюдается ФЛ от А-экситонов при высокой и низкой температурах. (b) Динамика ФЛ на большом временном интервале. Наблюдается ФЛ от связанных экситонов. (c)-(e) Пространственно-временная динамика ФЛ на разных временных интервалах. (f), (g) Зависимость квадрата ширины пространственного профиля ФЛ для А-экситонов (f) и связанных I-экситонов (g) [2]

Из-за большого времени жизни связанных экситонов они распространяются на расстояния вплоть до нескольких десятков мкм (рис. 2 (d), (e), (g)) с субдиффузионным характером распространения (рис. 2 (g)). Для объяснения данного эффекта была предложена теоретическая модель, которая учитывает влияние Оже-рекомбинации экситонов. На рис. 2 (b), (g) красной кривой показан расчет на основе данной модели, который хорошо совпадает с экспериментальными данными. Более подробно данные результаты изложены в нашей работе [2].

Работа поддержана мегагрантом № 075-15-2021-598.

## Литература

1. G. Wang, A. Chernikov, M. M. Glazov *et al.* // *Rev. Mod. Phys.*, V. 90, 021001 (2018).
2. M. A. Akmaev, M. M. Glazov, M. V. Kochiev *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 119, 113102 (2021).
3. S. A. Smagulova, P. V. Vinokurov, A. A. Semenova *et al.* // *Semiconductors* V. 54, 454 (2020).



# Поглощение двумерных плазмонов в структурах с несколькими квантовыми ямами

В.Я. Алешкин<sup>1,\*</sup>, А.А. Дубинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, 603087.

\*aleshkin@ipmras.ru

Теоретически изучено затухание двумерных (2D-) плазмонов в структурах с несколькими квантовыми ямами, обусловленное поглощением на свободных носителях. Рассмотрены как структуры с затвором, так и структуры без затвора. На примере структур с GaAs квантовыми ямами показано, что увеличение числа квантовых ям при сохранении концентрации электронов в каждой из них приводит к уменьшению коэффициента затухания двумерных плазмонов. Обсуждаются физические причины уменьшения поглощения плазмонов.

## Введение

Из-за небольшой фазовой скорости 2D-плазмонов коэффициенты их затухания, обусловленные поглощением на свободных носителях, достигают больших величин. Для улучшения работы устройств, использующих 2D-плазмоны [1-3], необходимо уменьшить затухание плазмонов. Очевидным способом это сделать является увеличение подвижности свободных носителей. Другим способом уменьшения затухания двумерных плазмонов является увеличение концентрации электронов в квантовых ямах (КЯ), поскольку коэффициент затухания обратно пропорционален двумерной концентрации электронов в КЯ. Однако, по технологическим причинам, создание высокой концентрации носителей заряда в квантовой яме при сохранении высокой подвижности затруднительно. Обычно для КЯ в GaAs структурах верхний порог концентрации для ям с высокой подвижностью  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . В связи с этим возникает естественный вопрос: а нельзя ли уменьшить затухание 2D-плазмонов увеличивая число квантовых ям с сохранением концентрации носителей в каждой из них? Изучению этого вопроса и посвящена эта работа.

## Метод нахождения характеристик плазмона

Пусть плоскости, в которых расположены  $N$  одинаковых квантовых ям, имеют координаты  $z_j$ , а плазмон распространяется вдоль оси  $x$ . У плазмона имеется  $y$ -компонента магнитного поля, и две компоненты электрического поля  $E_x$ ,  $E_z$ . Полагая зависимость полей от  $x$  и  $t$  в виде  $\exp(iqx - i\omega t)$ , из уравнений Максвелла получаем уравнение для  $E_x$ :

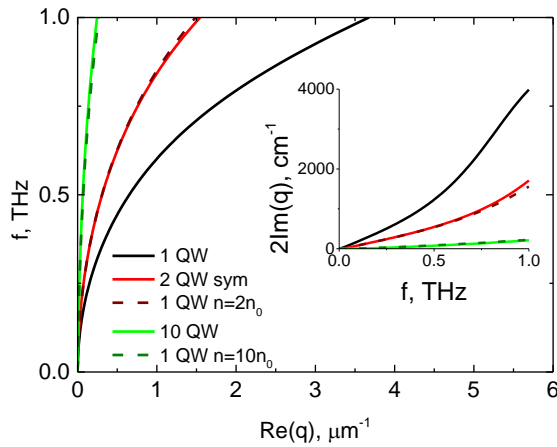
$$-i \frac{\partial}{\partial z} \frac{\kappa(z)}{\alpha^2(z)} \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\kappa(z)E_x + \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega} E_x \sum_{j=1}^N \delta(z - z_j) \quad (1)$$

где  $\kappa(z)$  — диэлектрическая проницаемость,  $\sigma(\omega) = e^2 n \tau / [m(1 - i\omega\tau)]$  — двумерная проводимость электронов в КЯ,  $n$  — двумерная концентрация электронов в КЯ,  $e$  и  $m$  — заряд и эффективная масса электрона,  $\tau$  — время релаксации импульса электрона,  $\alpha^2(z) = q^2 - \omega^2 \kappa(z) c^{-2}$ ,  $c$  — скорость света в вакууме. Уравнение (1) можно решать методом трансфер-матрицы [4]. Требование  $E_x \rightarrow 0$  для  $|z| \rightarrow \infty$  сводится к условию обращения в ноль одной из двух диагональных компонент трансфер-матрицы. Это условие является уравнением для нахождения спектра плазмонов.

## Результаты и обсуждение

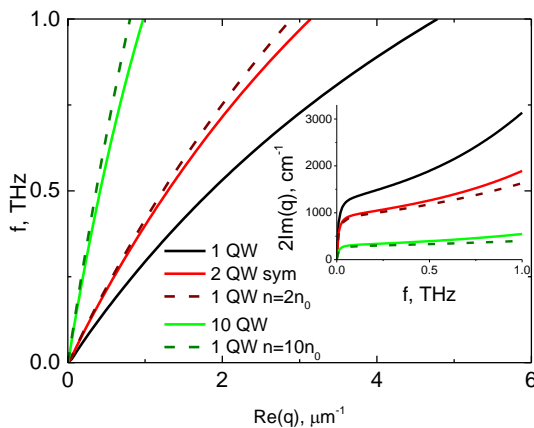
Расчеты проводились для структур GaAs с квантовыми ямами. Расстояние от поверхности GaAs до ближайшей КЯ полагалось равным 0.2 мкм, а расстояние между КЯ  $d=60$  нм. Электронная концентрация в КЯ и подвижность полагались равными  $n_0=5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , соответственно. Можно показать, что затухание плазмонных мод, у которых нет нулей  $E_x$ , меньше по сравнению с модами, у которых имеются нули  $E_x$ . Поэтому далее рассматривались только моды без нулей  $E_x$ .

На рис. 1 приведены вычисленные зависимости частоты плазмона  $f = \omega / 2\pi$  от действительной части волнового вектора  $q$  в структурах с 1, 2 и 10 КЯ без затвора. Для сравнения приведены аналогичные зависимости в структуре с одной квантовой ямой с концентрациями  $2 \cdot n_0$  и  $10 \cdot n_0$ . На вставке к рисунку приведены спектры коэффициентов поглощения для этих структур.



**Рис. 1.** Зависимость частоты плазмона от реальной части волнового вектора в структурах с 1, 2 и 10 КЯ без затвора. На вставке приведены спектры коэффициента поглощения этих структур

На рис. 2 изображены аналогичные зависимости для подобных структур с металлическим затвором.



**Рис. 2.** Зависимость частоты плазмона от реальной части волнового вектора в структурах с 1, 2 и 10 КЯ с затворами. На вставке приведены спектры коэффициента поглощения этих структур

Из рисунков хорошо видно, что зависимости частоты плазмона от волнового вектора для структуры с несколькими КЯ близки в рассматриваемом диапазоне к аналогичным зависимостям в структуре с одной квантовой ямой, но с концентрацией электронов умноженной на число квантовых ям. Аналогичное утверждение справедливо и для зависимости коэффициента поглощения ( $2\text{Im}(q)$ ) от частоты.

Обсудим теперь причину того, почему характеристики плазмонов в многоямных структурах в рассматриваемом частотном диапазоне близки к характеристикам в одноямной структуре с концен-

трацией электронов  $n_0$ , умноженной на число КЯ. Как видно из рис. 1 и 2 действительная часть волнового вектора в рассматриваемом частотном диапазоне удовлетворяет условию  $\text{Re}(q)d \ll 1$ . В квазистатическом приближении, которое хорошо выполняется в наших расчетах масштаб изменения электрических полей плазмона в  $z$  направлении  $1/\text{Re}(q)$  [5]. Поэтому в рассмотренных случаях масштаб изменения полей плазмона много больше, нежели расстояние между ямами. По этой причине плазмон «чувствует» набор квантовых ям как одну эффективную квантовую яму с проводимостью равной сумме проводимостей квантовых ям и расположенной в «средней» координате по  $z$ . Поэтому использованное в работе приближение о равенстве электронных концентраций и подвижностей в квантовых ямах несущественно. Отметим, что добавление квантовой ямы приводит к уменьшению  $\text{Re}(q)$  при фиксированной частоте, т.е. к увеличению масштаба изменения электрических полей вдоль оси  $z$ .

На основании проведенных расчетов можно сделать следующий вывод: увеличение числа квантовых ям при сохранении электронной концентрации в них приводит к уменьшению затухания плазмона в том случае, когда произведение расстояния между квантовыми ямами на волновой вектор плазмона много меньше единицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-42-09039).

## Литература

1. W. Knap, Y. Deng, S. Rumyantsev, and M.S. Shur // *Appl. Phys. Lett.*, V. 81, 4637 (2002).
2. E.A. Shaner, M. Lee, M.C. Wanke, A.D. Grine, J. L. Reno, and S. J. Allen, *Appl. Phys. Lett.*, V. 87, 193507 (2005).
3. V.M. Muravev, V.V. Solov'ev, A.A. Fortunatov, G.E.Tsydynzhapov, I.V.Kukushkin// *JETP Letters* V. 103, 792 (2016).
4. D.A. Smirnova, I.V. Iorsh, I.V. Shadrivov, Y.S.Kivshar // *JETP Lett.*, V. 99, 456 (2014).
5. V.A. Volkov, S.A. Mikhailov in book "Landau level spectroscopy", ed. by G.Landwehr and E.I.Rashba. Elsirver Science publishers B.V. 1991.

# Туннельный транспорт в сверхрешетках InAs/AlSb с электрическими доменами

И.В. Алтухов<sup>1</sup>, М.С. Каган<sup>1</sup>, С.К. Папроцкий<sup>1</sup>, Н.А. Хвальковский<sup>1</sup>, С.Е. Дижур<sup>1</sup>,  
Н.Д. Ильинская<sup>3</sup>, А.А. Усикова<sup>3</sup>, А.Н. Баранов<sup>4</sup>, R. Teissier<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Моховая 11-7, Москва, 125009.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское шоссе 31, Москва, 115409.

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая 26, С. Петербург, 194021.

<sup>4</sup> IES, Université Montpellier 2, CNRS, place Eugène Bataillon, Montpellier 34095, France.

\*kagan@cplire.ru

Исследовалась обнаруженная ранее серия квазипериодических максимумов на ВАХ сверхрешеток (СР) InAs/AlSb при напряжениях в области образования доменов. Изучена эволюция этих максимумов в СР InAs/AlSb с разной шириной квантовых ям. Предложено объяснение, связывающее эти максимумы с туннельными переходами между квантовыми ямами в треугольном домене, сопровождающимися испусканием оптических фононов, и учитывающее влияние вышележащих уровней размерного квантования.

## Введение

Изучался туннельный электронный транспорт в сверхрешетках (СР) InAs/AlSb с электрическими доменами. Ранее было обнаружено влияние ТГц резонатора на электронный транспорт в СР GaAs/AlAs с движущимися доменами и получены данные, указывающие на возбуждение ТГц резонатора за счет отрицательного сопротивления СР с доменами [1]. Естественно, условия возбуждения резонатора должны зависеть от режимов образования доменов. В настоящей работе исследована эволюция туннельного тока в СР InAs/AlSb с доменами для структур с разной шириной квантовых ям.

## Образцы и методика измерений

СР InAs/AlSb, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии, находились между сильно легированными ( $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>) подложкой и верхним контактном слоем n<sup>+</sup>-InAs. СР были легированы мелкими донорами в концентрации  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Изучались СР (60 периодов) с одинаковыми барьерами (3,5 нм AlSb), но с разной шириной квантовых ям (КЯ): 4, 5 и 6 нм. К образцам прикладывались треугольные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5-10 мксек. Из зависимостей напряжения и тока от времени восстанавливались вольтамперные характеристики (ВАХ).

Исследовались квазипериодические максимумы, наблюдавшиеся на ВАХ СР InAs/AlSb при напряжениях в области образования доменов.

## Результаты и обсуждение

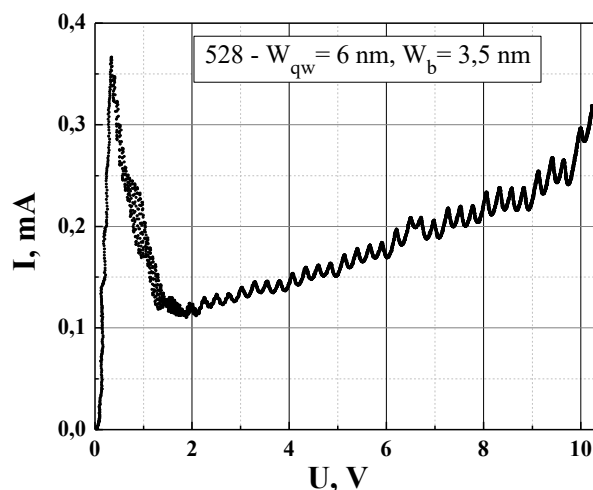


Рис. 1. ВАХ СР InAs/AlSb с толщиной КЯ 6 нм

На рис. 1-3 приведены вольтамперные характеристики трех СР InAs/AlSb с разной толщиной квантовых ям 4, 5 и 6 нм. При сравнительно слабых напряжениях имеет место резонансное туннелирование по нижней минизоне с линейным начальным участком. Резкое падение тока при некотором пороговом напряжении вызвано образованием движущихся доменов. Расчёт дисперсионных характеристик СР показал, что ширина первой минизоны в нашем случае около 26 мэВ. Таким образом, при напряжениях  $U$  выше 1.5 В в соседних КЯ снимается перекрытие первых минизон, и проводимость осуществляется за счёт нерезонансного туннелирования с релаксацией носителей на акустических фононах, что должно приводить к монотонному

росту тока. Рост тока (в среднем), наблюдаемый при напряжениях выше порогового, свидетельствует о треугольной форме дипольного домена. Происхождение треугольной формы движущегося домена вызвано следующим. Для того, чтобы обеспечить перепад между областями сильного и слабого поля (вне и внутри домена), необходим достаточно большой заряд на границах ("стенках") домена. Как показывают оценки [2], этот заряд должен быть примерно на порядок больше, чем уровень легирования в наших СР. Поэтому отрицательный заряд на одной из границ домена (в одной КЯ) создается свободными электронами, а положительный заряд на другой границе – положительно заряженными донорами (концентрация которых на порядок меньше необходимой для формирования границы домена). Из-за полного опустошения доноров и появляется линейный участок зависимости поля от координаты внутри домена.

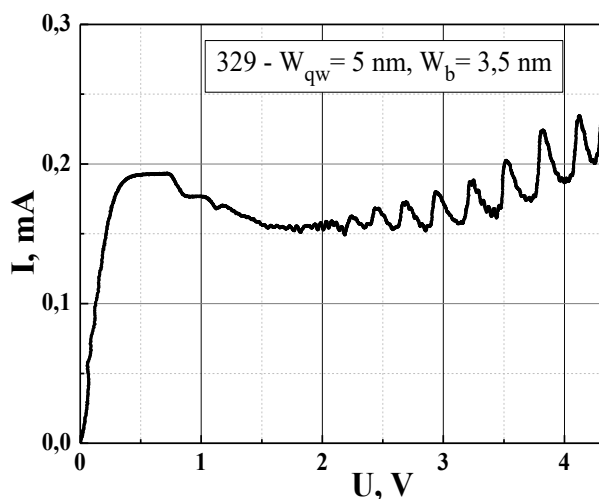


Рис. 2. ВАХ СР InAs/AlSb с толщиной КЯ 5 нм

При  $U > 1.5$  В на вольтамперных характеристиках наблюдается ряд эквидистантных максимумов. С ростом напряжения увеличивается как длина домена, так и величина максимального поля в нем. Период этих осцилляций по напряжению для образцов, ВАХ которых приведены на рис. 1 и 2, соответствует расширению домена на один период СР, т.е. периодические изменения тока в СР с квантовыми ямами 5 и 6 нм связаны с перескоками границы домена в соседнюю квантовую яму. Совершенно другая картина наблюдается для СР с толщиной квантовых ям 4 нм. Период осцилляций по напряжению здесь значительно больше, чем в предыдущих образцах и не соответствует перескокам границы домена между соседними КЯ. Причина этого,

по нашему мнению, заключается в том, что при увеличении ширины КЯ растет энергетическое расстояние между уровнями размерного квантования в КЯ и, соответственно, растет максимальное поле в домене. Мы связываем эти максимумы с туннельными переходами между КЯ в треугольном домене, сопровождающимися испусканием оптических фононов. Максимальное поле в домене можно оценить с помощью уравнения Пуассона, считая СР сплошной средой, а также оценить разность потенциалов между соседними квантовыми ямами в вершине треугольного домена. Такая оценка (безусловно, очень грубая) показывает, что в узкой КЯ эта разность оказывается больше энергии оптического фонона. Тогда происхождение максимумов сводится к следующему. При напряжениях, когда разность энергий основных уровней размерного квантования является кратной энергии оптического фонона, туннельный переход между соседними КЯ происходит с испусканием оптических фононов. При выходе из этого резонанса туннельный ток должен сильно уменьшаться. Естественно, основной вклад в туннельный ток в домене должны давать КЯ вблизи максимума поля, так как на них падает основное напряжение. Работа выполнена в рамках госзадания при частичной поддержке РФФИ (грант 20-02-00624).

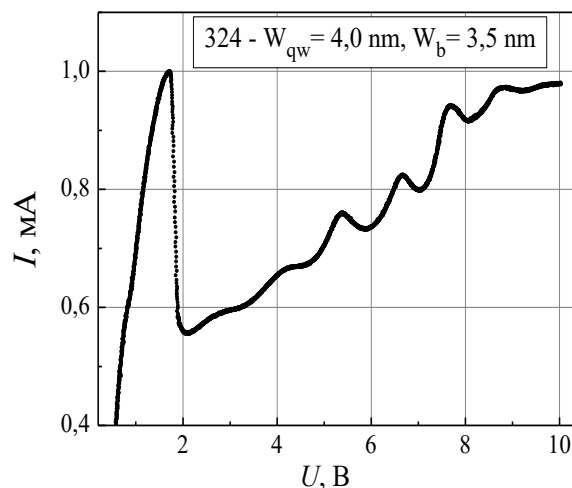


Рис. 2. ВАХ СР InAs/AlSb с толщиной КЯ 4 нм

## Литература

1. И.В. Алтухов, М.С. Каган, С.К. Папроцкий и др. // Письма в ЖЭТФ, Т. 103, 128 (2016).
2. С.К. Папроцкий, И.В. Алтухов, М.С. Каган и др. // Радиотехника и электроника Т. 64, 1025 (2019).



# Рост и исследование буферных слоев Ge/Si (001) для лазерных структур на основе полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>

А.И. Андрианов<sup>1,\*</sup>, А.А. Сушков<sup>1</sup>, В.А. Воронцов<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, Д.М. Балясников<sup>1</sup>, Д.А. Таран<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр-т Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*artem.beyl@mail.ru.

Сформированы и исследованы гетероструктуры Ge/Si/Si (001) и Ge/Si (001). Для роста слоев использовался метод молекулярно-лучевой эпитаксии. В образце Ge/Si (001) для роста слоя Ge применялся режим «двухстадийного» роста. Оценка кристаллического качества проводилась с помощью просвечивающей электронной микроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света. Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью атомно-силовой микроскопии. В структуре Ge/Si/Si (001) на поверхности Si (001) сформировались островки Ge, которые имеют различную высоту. В структуре Ge/Si (001), где использовался режим «двухстадийного» роста, удалось подавить островковый рост Ge. Гетерограница Ge/Si в структуре Ge/Si (001) обладает высокой плотностью дефектов. В дальнейшем планируется проводить ростовые эксперименты с целью уменьшения дефектов и шероховатости поверхности.

## Введение

Монолитная интеграция полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> с Si технологией может способствовать решению вопросов создания суперкомпьютера. Например, позволит решить вопрос с выделением большого количества тепла от проводных линий связи между разными узлами системы за счет их замены на оптические линии связи, в которых источник излучения на основе материалов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> будет интегрирован непосредственно в микросхему [1]. Одним из подходов совмещения полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> с Si технологией является эпитаксиальный рост материалов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> на подложках Si через буферные слои Ge/Si [2]. Одним из методов роста данных буферных слоев является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако, при формировании буферных слоев Ge/Si будут неизбежно возникать деформации из-за рассогласования в параметрах постоянной решетки Si и Ge, которое составляет 4%. При разработке приборов на основе данных гетероструктур требуется минимальное значение плотности дефектов в слоях, чтобы в лазере преобладали процессы излучательной рекомбинации над безызлучательной.

## Методика эксперимента

Рост слоев Ge и Si осуществлялся в высоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии УВН-83П1. Поток атомов Si на подложку создавался сублимацией кремниевого бруска, разогретого с помощью протекания тока. Слои Ge были выращены из расплава Ge по запатентованной методике роста

(RU165625U1). Перед выращиванием буферного слоя Si в Ge/Si/S(001) производился высокотемпературный отжиг подложки при температуре T = 700 °C в течении 30 мин. Далее температура подложки опускалась до 650 °C и при температуре T = 1325 °C происходила сублимация Si в течении 10 мин. Слой Ge выращивался при температуре источника 1050 °C. В платформах Ge/Si (001) слой Ge выращивался с использованием режима «двухстадийного» роста, который хорошо себя зарекомендовал для роста слоя Ge на подложке Si с плотностью прорастающих дислокаций порядка 10<sup>7</sup> см<sup>-2</sup> и среднеквадратичной шероховатостью поверхности менее 1 нм [3]. Перед ростом слоя Ge производился отжиг при температуре 1000 °C в течении 30 мин. Далее при температуре подложки 300 °C производился рост LT-Ge в течении 5 мин. Далее температура подложки поднималась до 750 °C и выращивался слой HT-Ge в течении 10 минут. Кристаллическое качество образцов оценивалось с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-2100F (200 кВ). Полученные структуры также исследовались методами спектроскопии комбинационного рассеяния света и атомно-силовой микроскопии. Спектры комбинационного рассеяния света были получены на комплексе рамановской спектроскопии NTEGRA Spectra производства компании NT-MDT (г. Зеленоград). Возбуждающее излучение фокусировалось 100x объективом с числовой апертурой 0.90. Спектры КРС были получены в схеме на отражение с разрешением 0.8 см<sup>-1</sup>. Морфология поверхности исследуемых образцов снималась с использованием

атомно-силовой сканирующей головки Smeпа, на базе зондовой нанолaborатории NTEGRA Spectra в полуконтактном режиме.

## Результаты и обсуждение

На спектре КРС структуры Ge/Si (001) (Рисунок 1) присутствует пик, соответствующий колебаниям связей Si–Ge на частоте примерно  $385\text{ см}^{-1}$  и пик на частоте  $300\text{ см}^{-1}$ , который соответствует колебаниям связей Ge–Ge. Стоит отметить, что связи Si–Ge могут

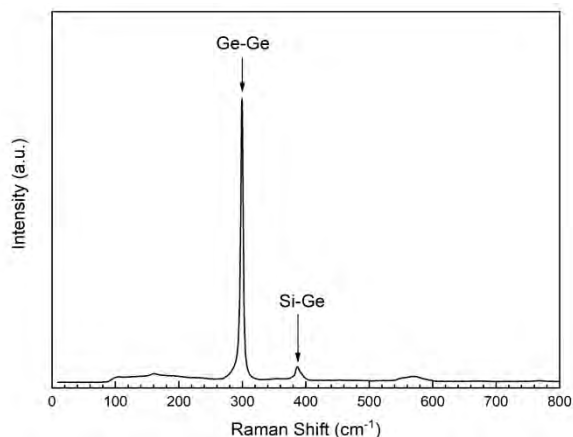
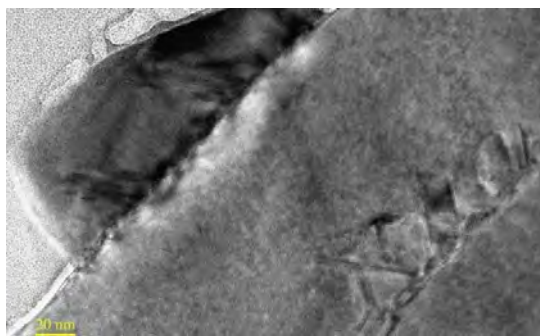


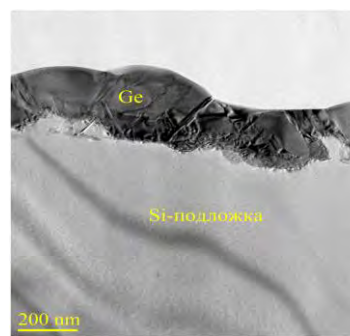
Рис. 1. Спектры КРС от структуры Ge/Si (001)

образовываться не только на гетерогранице Ge/Si, но и в объеме слоя Ge. Это возможно благодаря диффузии атомов Si из подложки в слой Ge во время роста Ge [3].

Шероховатость поверхности образцов, оцененная из АСМ-сканов площадью  $10 \times 10\text{ мкм}^2$ , составляла для



а



б

Рис. 2. а) ПЭМ-изображения структуры Ge/Si/Si (001), б) ПЭМ-изображения структуры Ge/Si (001)

образца Ge/Si/Si (001) —  $96\text{ нм}$ , а для структуры Ge/Si (001), которая была получена с использованием режима «двухстадийного роста» —  $63\text{ нм}$ . При анализе изображений поперечного среза образцов, полученных методом ПЭМ (ПЭМ-изображения), можно заметить, что в структуре Ge/Si/Si (001) на поверхности Si (001) сформировались островки Ge. Их высота варьируется от  $d_{\text{Ge}} = (102 \pm 5)\text{ нм}$  до  $d_{\text{Ge}} = (127 \pm 7)\text{ нм}$ . Также методом ПЭМ было установлено, что подложка для гетероструктуры Ge/Si/Si (001) была очищена недостаточно. Этот вывод можно сделать по наличию дефектов упаковки и двойникования на гомогранице Si и подложки Si (рисунок 2 (а)). Толщина слоя Si в данной структуре  $d_{\text{Si}} = (134 \pm 9)\text{ нм}$ . Толщина слоя Ge в структуре Ge/Si/Si (001) составила  $(210 \pm 35)\text{ нм}$ . Исследование методом ПЭМ показывает, что гетерограница Ge/Si обладает высокой плотностью дефектов, образование которых связано с релаксацией упругих напряжений, возникающих между слоями из-за рассогласования в постоянных параметрах решёток (4%). Использование режима «двухстадийного» роста позволило избавиться от островкового роста Ge (рисунок 2 (б)). В дальнейшем планируется проводить ростовые эксперименты с целью уменьшения дефектов и шероховатости поверхности.

Исследование поддержано стипендией Президента РФ (СП-1790.2022.5).

## Литература

1. D. Liang, J. E. Bowers // *Nature Photonics*, V. 4, 511 (2010).

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

3. D. V. Yurasov, V. M. Daniltsev, A. V. Novikov, *et al.* // *Semiconductors*, V. 49, 1415 (2015).

# Гетероструктуры на основе фторированного графена для наноэлектроники

И.В. Антонова<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им.А.В. Ржанова СО РАН, ул. Лаврентьева, 13, Новосибирск 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, ул. К Маркса, 20, Новосибирск, 630073.

\*antonova@isp.nsc.ru

В докладе рассматриваются свойства латеральных и вертикальных гетероструктур графен/фторированный графен для современной наноэлектроники, включая гибкую и печатную электронику. Фторированный графен был получен с использованием нашей оригинальной, простой и дешевой технологии, основанной на обработке графена или суспензии графена в водном растворе плавиковой кислоты. Получаемый в результате материал перспективен для приложений в сочетании с другими 2D материалами.

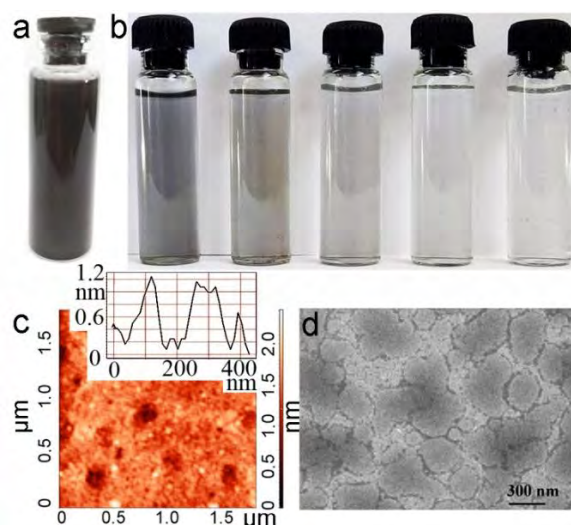
## Введение

Латеральные и вертикальные гетероструктуры на основе двумерных (2D) материалов требуют для успеха в их разработки диэлектрический материал, сочетающийся, в частности с графеном, и обладающий достаточно хорошими свойствами, такими как низкие токи утечки, низкий встроенный заряд, простые и доступные технологии получения и нанесения на другие материалы. Для гексагонального нитрида бора, который считается наиболее перспективным диэлектриком до настоящего времени отсутствует технология его получения, за исключением отслоения небольших частиц от объемного кристалла h-BN. С этой точки зрения фторированный графен способен занять значительную нишу перспективного диэлектрического материала.

## Получение фторированного графена

Недавно мы разработали процесс фторирования графена, который позволяет получать материалы с уникальными электрическими характеристиками (от проводников до изоляторов, в зависимости от степени фторирования) [1-3]. Метод основан на обработке графена или мультислойного графена, а также суспензий графена в водном растворе плавиковой кислоты. Полученный фторированный графен (ФГ) имел степень фторирования до ~ 30-35%, при этом происходит переход в изолирующее состояние. Было показано, что процесс фторирования в зависимости от времени обработки может быть использован для пассивации краев и дефектов в графене, для создания туннельно-прозрачных барьеров на границах доменов графена, а также для формирования массивов квантовых точек графена в матрице ФГ (при степени фторирования около 20-25%). Однако

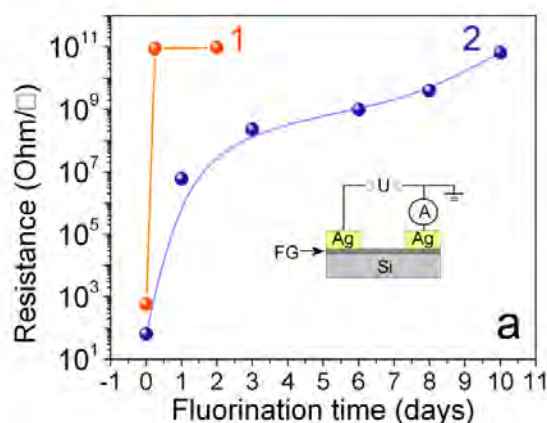
при изготовлении гетероструктур из-за высокой стабильности ФГ (энергия связи C-F-связи составляет 124 ккал / моль, температура дефторирования ~ 450 ° C) возникли трудности с наноструктурированием и было предложено использование суспензий фторированного графена для изготовления пленок ФГ и 2D-печати. Была отработана технология получения частиц ФГ толщиной не более 1.5 нм, что позволяет печатать слои с шероховатостью ~0.5-2 нм.



**Рис. 1.** (а) Исходная суспензия графена с размером частиц 1,2-0,4 мкм и составом ~ 1 мг/мл и (б) та же суспензия, фторированная в 6% -ном растворе HF в воде в течение 3, 5, 7, 9 и 11 дней (слева направо). (с) АСМ и (д) СЭМ-изображения пленки ФГ на кремниевой подложке после фторирования в течение 6 суток. Вставка в (с) показывает профиль, пересекающий три отдельные чешуйки

Из суспензий графена, полученных электрохимическим расслоением высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) и дополнительной обработки полученной смеси частиц графита ультразвуком, путем фильтрации трековыми мембранами,

частицы с латеральными размерами частицы размером 0,4–1,2 мкм и менее 0,4 мкм. Исходная суспензия графена после разного по времени фторирования показаны на рисунке 1 (а, b). Увеличение времени фторирования приводит к увеличению прозрачности суспензии за счет роста степени фторирования. Кроме того, фторирование приводит к сильному уменьшению латерального размера и толщины частиц. Чем выше степень фторирования, тем меньше размер и толщина частиц. АСМ- и СЭМ-изображения пленок, созданных из суспензии, фторированной в течении 6 дней, представлены на рис. 1с, d. Вертикальный масштаб АСМ-изображения и профиль, пересекающий три отдельные чешуйки, демонстрируют рельеф пленки ФГ (2 нм). Шероховатость, рассчитанная по нескольким изображениям АСМ размером 2-3 мкм, составила 0,3 - 0,5 нм.



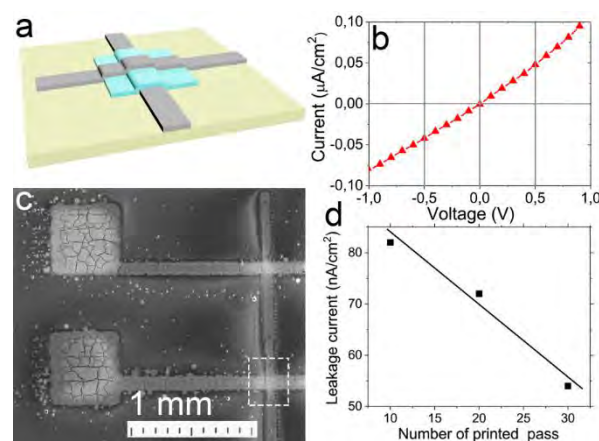
**Рис. 2.** Сопротивления пленок, полученных из суспензий, фторированных в водном растворе плавиковой кислоты, измеренные в латеральной конфигурации. Кривые соответствуют различным суспензиям, используемым для фторирования: 1 - суспензия из частиц размером менее 0,4 мкм, 2 - частицы размером 0,4 - 1,2 мкм

На рис. 2 показано сопротивление пленок ФГ, нанесенных на подложки SiO<sub>2</sub> из суспензий с разным размером исходных частиц графена в зависимости от времени фторирования. Увеличение сопротивления соответствует созданию сначала фторированного графена с квантовыми точками графена, а затем к переходу в изолированное состояние при 30–35% фторирования. Видно, что уменьшение размера чешуек исходной суспензии графена приводит к резкому сокращению необходимого времени фторирования.

### Параметры диэлектрических слоев, созданных 2D печатью

С помощью 2D печати были изготовлены структуры метал-изолятор-полупроводник (МДП, Ag/ФГ/Si) с

толщиной ФГ слоя 20–40 нм. Измерения вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики для таких структур было показано, что ФГ пленки демонстрировали сверхнизкий встроенный заряд  $(0,5-2) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и примерно такую же плотность состояний на гетерогранице с кремнием. Следует отметить, что, как правило, широко используемые диэлектрические пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, оксид графена и др. аналогичной толщины имеют гораздо более высокий на 1,5-2 порядка встроенный заряд. Для структур Ag/ФГ/Ag (Рис.3) с толщиной слоя ФГ 20–40 нм токи утечки были менее  $10^{-8} \text{ А/см}^2$ , что в сочетании с ультранизким встроенным зарядом делает пленки ФГ перспективными для гетероструктур из графена и других 2D материалов. Других аналогов таких пленок в настоящее время нет.



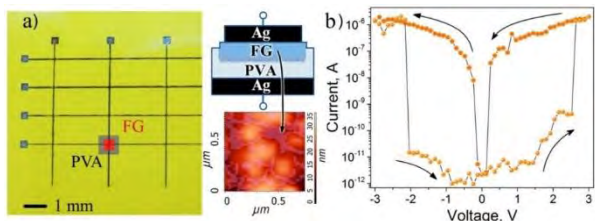
**Рис. 3.** (а) схематическое изображение и (в) СЭМ-изображение напечатанных структур Ag / FG / Ag. Пунктирный прямоугольник на оптическом изображении показывает размер и расположение напечатанного слоя фторированного графена. (б) ВАХ для десяти напечатанных слоев ФГ. (д) Ток утечки через слой FG как функция номера напечатанного слоя при напряжении смещения 1 В

### Приборные структуры с использованием фторированного графена

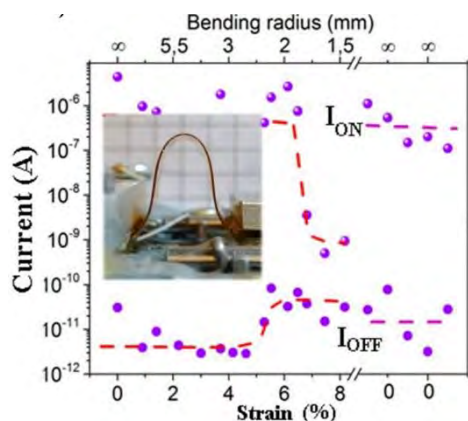
Было обнаружено, что пленки ФГ с квантовыми точками графена, напечатанные на пленках поливинилового спирта, демонстрируют стабильный биполярный резистивный эффект переключения с соотношением тока ON/OFF от 4 до 5 порядков [4]. Степень фторирования составляла ~ 20–25%. Активный слой структур Ag/FG/PVA/Ag из фторированного графена на поливиниловоом спирте (PVA) были изготовлены путем печати на поверхности гибкой подложки (см. Рис.4). Из-за прозрачности пленки FG /



PVA напечатанный активный слой не виден на рисунке и схематично показан для одной из структур. Площадь рабочих структур составляла  $60 \times 60 \text{ мкм}^2$ , толщина ПВС составляла около 100 нм, а толщина FG-слоя составляла  $\sim 4 \text{ нм}$ . Если учесть, что пористая структура PVA образовалась за счет растворения слоя PVA в воде при печати ФГ, то толщина ФГ в рабочих структурах была менее 4 нм.



**Рис. 4.** (а) Вертикальные поперечные структуры Ag/PFG/PVA/Ag на полиимидной подложке. Схематический разрез напечатанной структуры и изображение поверхности активного слоя показаны на вставках. (б) Вольт-амперные характеристики напечатанной структуры, измеренные до деформации

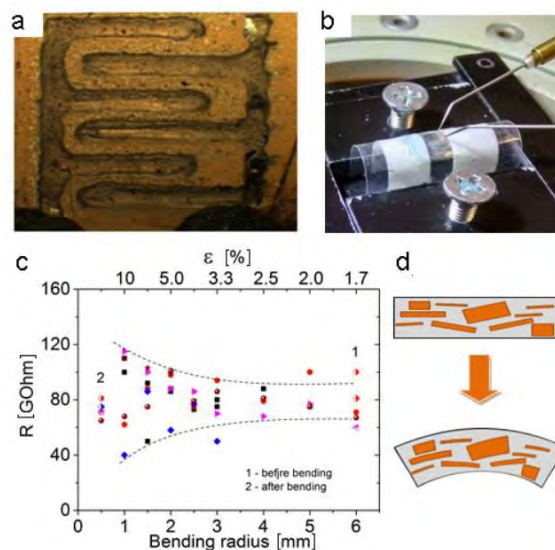


**Рис. 5.** Зависимость тока в открытом и закрытом состояниях от деформации растяжения и радиуса изгиба структуры. Последние точки соответствуют переключениям после снятия деформации. На вставке изображение деформированной структуры

Устойчивость при механических деформациях исследована для печатных структур в условиях растяжении при изгибах. Переключение сопротивления перед изгибом приведено на рис.4. Как показано на Рис. 5, мемристоры сохраняют свои характеристики до 6,5% деформации, соответствующей радиусу изгиба 2 мм, и после снятия механической деформации переключения полностью восстанавливаются.

Структуры, изготовленные из слоя частично фторированного графена с квантовыми точками графена тол-

щиной 30 нм и напечатанными Ag контактами демонстрирует хорошую гибкость, когда изменение сопротивления слоя наблюдается при радиусе изгиба менее 2 мм, что соответствует  $\sim 5\%$  деформации (Рис. 6).



**Рис. 6.** (а, б) Оптическое изображение структуры, созданной из суспензии частично фторированного графена толщиной около 30 нм на ПЭТ с контактами из серебра в форме двух встречно-штыревых контактов. (с) Сопротивление пленки в зависимости от радиуса изгиба и деформации при многократных измерениях. Точки 1 и 2 соответствуют сопротивлению до и после изгиба. (д) Схематическое изображение пленки ФГ до и во время изгиба

В тезисах приведены только некоторые из создаваемых структур, дающие представление о свойствах и возможностях применения фторированного графена. Гетероструктуры графен / фторированный графен и композиты на основе фторированного графена демонстрируют перспективность их использования для разработки графеновой электроники, включая гибкую и печатную электронику.

## Литература

1. N A Nebogatikova, I V Antonova, V A Volodin, *et al.* // *Physica E*, V. 52, 106 (2013).
2. I.V. Antonova, I.A. Kotin, I.I. Kurkina, *et al.* *J. Mat. Sci. &Engin.* V. 6, 1000379 (2017).
3. I.V. Antonova, I.I. Kurkina, A.K. Gutakovskii, *I et al.* // *Materials & Design*, V.164, 107526 (2019).
4. A.I. Ivanov, N.A. Nebogatikova, I.A. Kotin, *et al.* // *Nanotechnology* V. 30, 255701 (2019).

# Управление наноструктурами на основе прямоугольных квантовых ям с помощью униполярных световых импульсов

Р.М. Архипов<sup>1, 2, \*</sup>, М.В. Архипов<sup>1, \*\*</sup>, А.В. Пахомов<sup>1, \*\*\*</sup>, П.А. Белов<sup>3, \*\*\*\*</sup>,  
И.В. Бабушкин<sup>4, °</sup>, Н.Н. Розанов<sup>1, 2, §</sup>

1 Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034.

2 Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021.

3 Лаборатория Оптики спина им. И. Н. Уральцева СПбГУ, ул. Ульяновская д.1, Санкт-Петербург, Петродворец, 198504.

4 Institute of Quantum Optics, Leibniz University Hannover and Cluster of Excellence PhoenixD (Photonics, Optics, and Engineering Innovation Across Disciplines) Welfengarten 1, Hannover, Germany, 30167.

\*arkhipovrostislav@gmail.com, \*\*m.arkhipov@spbu.ru, \*\*\*antpakhom@gmail.com, \*\*\*\*pavelbelov@gmail.com, °babushkin@iqo.uni-hannover.de, §nnrosanov@mail.ru

На основании решения временного уравнения Шредингера показана возможность эффективного и сверхбыстрого управления наноструктурами на основе одномерных квантовых ям с помощью униполярных аттосекундных импульсов, обладающих ненулевой электрической площадью.

Аттосекундные электромагнитные импульсы активно используются для изучения динамики волновых пакетов в атомах, молекулах и твердых телах, так как характерный период осцилляций волновых пакетов в веществе лежит в аттосекундном диапазоне длительностей [1]. Однако получаемые на практике сверхкороткие импульсы содержат несколько циклов колебания и являются биполярными – в них вектор напряженности электрического поля много раз изменяет свое направление на противоположное за время длительности импульса. И их электрическая площадь, определяемая как интеграл от напряженности электрического поля по времени в данной точке пространства,  $S_E = \int E(t)dt$ , всегда равна нулю.

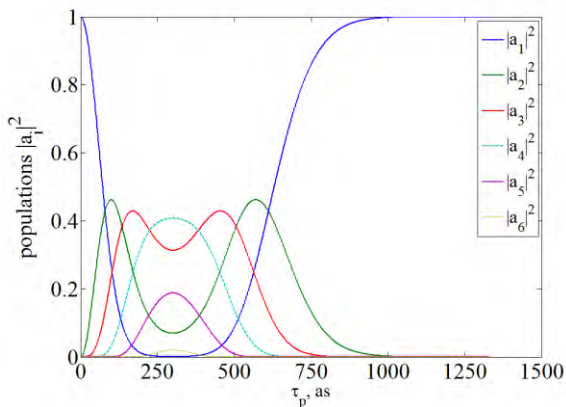
В последние годы активно изучается возможность дальнейшего сокращения длительности импульсов вплоть до получения униполярных полупериодных импульсов, содержащих половину периода поля (полуволну поля). Такие импульсы могут обладать ненулевой электрической площадью см. обзор [2], а также работы [3-5] и цитируемую литературу. Если длительность такого полупериодного импульса меньше характерного периода осцилляций волновых пакетов в веществе, то они способны оказывать более быстрое и эффективное воздействие на волновые пакеты по сравнению с биполярными многоцикловыми импульсами [2,6-8]. В этом случае не применима теория фотоионизации Келдыша. Воздействие на микрообъекты определяется электрической

площадью импульса, а не его энергией, см. например [7,8]. Некоторые методы экспериментального определения униполярности импульсного терагерцового излучения были впервые предложены сравнительно недавно [9]. Для характеристики эффективности воздействия униполярных импульсов на микрообъекты недавно была введена новая физическая величина – атомная мера площади  $S_{E,at}$  [7,8]. Она является универсальной и обратно пропорциональна характерному размеру системы.

В последние годы активно изучается взаимодействие аттосекундных и фемтосекундных биполярных электромагнитных импульсов с различными наноструктурами на основе металлов или диэлектриков [10,11]. В различных наноструктурах значения времен релаксации может лежать в фемтосекундном диапазоне. Поэтому, для сверхбыстрого когерентного управления волновыми пакетами в таких системах требуются именно аттосекундные импульсы.

В данном докладе на основе приближенного аналитического и численного решения временного уравнения Шредингера изучается взаимодействие униполярных полупериодных аттосекундных импульсов с наноструктурами. Они моделируются на основе одномерной прямоугольной потенциальной ямы конечной и бесконечной глубины. Такая модель, несмотря на ее простоту, используется для моделирования различных металлических наночастиц, полу-

проводниковых наноструктур и т.д. [11,12]. Длительность импульса возбуждения предполагается короче периода осцилляций волновой функции в связанном состоянии. Показано, что населенности связанных состояний в яме, а также вероятность ионизации определяются отношением электрической площади импульса к ее атомной мере,  $S_E/S_{E,at}$ .



**Рис. 1.** Населенности первых 6-ти связанных состояний в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками

Показана возможность эффективного управления населенностями связанных состояний электрона в яме с помощью униполярных импульсов, по сравнению с биполярными импульсами, см. рис.1. На рис.1 показаны населенности первых 6-ти связанных состояний электрона в прямоугольной потенциальной яме бесконечной глубины с шириной  $a=1.2 \cdot 10^{-7}$  см в зависимости от длительности импульса возбуждения  $\tau_p$ . Система возбуждалась импульсом гауссовой формы  $E(t) = E_0 e^{-\frac{t^2}{\tau_p}} \cos \frac{2\pi}{T} t$ ,  $E_0 = 2 \cdot 10^8$  В/см, период поля  $T = 1.33$  фс.

Из рис.1 видно, что униполярные полупериодические импульсы с длительностью менее периода поля,  $\tau_p < T$ , практически полностью опустошают основное состояние, в то время как одноцикловые импульсы (обладающие нулевой электрической площадью) с длительностью порядка  $T$  не возбуждают систему.

Также из рис.1 видно, что при определенных значениях длительности импульса населенности некоторых связанных состояний имеют максимум и превосходят по величине населенности др. состояний (например максимумы зеленой кривой в районе 100

и 600 as). Это говорит о возможности селективного заселения связанных состояний и о возможности создания инверсной населенности с помощью полупериодных импульсов, см. например [13,14]. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта 21-72-10028.

## Литература

1. D. Hui, H. Alqattan, S. Yamada *et al.* // Nature Photonics, V. 16, 33 (2022).
2. Р.М. Архипов, М.В.Архипов, Н.Н. Розанов, Квант. электрон., V. 50, 801 (2020).
3. H.-C. Wu and J. Meyer-ter-Vehn, Nat. Photonics, V. 6, 304 (2012).
4. J. Xu, B. Shen, X. Zhang *et al.* // Sci. Rep. V. 8, 2669 (2018).
5. A.V. Bogatskaya, E.A.Volkova, A.M. Popov, Physical Review E, V. 104, 025202 (2021).
6. R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, I. Babushkin *et al.* // Opt. Lett. V. 44, 1202 (2019).
7. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, А. В. Пахомов, Н. Н. Розанов, Письма в ЖЭТФ, Т. 114(3), 156 (2021).
8. N. Rosanov, D. Tumakov, M. Arkhipov, R. Arkhipov, Physical Review A, V. 104 (6), p. 063101 (2021).
9. М. В. Архипов, А. Н. Цыпкин, М. О. Жукова *и др.* // Письма в ЖЭТФ, Т. 115, 3 (2022).
10. L. Seiffert, S. Zherebtsov, M. F. Kling, T. Fennel, arXiv:2109.02367 (2021).
11. L. Shi, I. Babushkin, A. Husakou, O. Melchert *et al.* // Laser & Photonics Reviews, V. 15, 2000475 (2021).
12. Ж.И. Алферов, Физика и техника полупроводников, Т. 32, 3 (1998).
13. R. Arkhipov, A. Pakhomov, M. Arkhipov *et al.* // Optics Express 28, 17020 (2020).
14. Р. М. Архипов М. В. Архипов, П. А. Белов *и др.* // Опт. Спектр. Т. 130(4), (2022), в печати.

# Электрофизические свойства дельта-легированных бором слоев алмаза

Е.А. Архипова<sup>1,\*</sup>, М.Н. Дроздов<sup>1</sup>, С.А. Краев<sup>1</sup>, О.И. Хрыкин<sup>1</sup>, С.А. Богданов<sup>2</sup>,  
А.Л. Вихарев<sup>2</sup>, В.А. Исаев<sup>2</sup>, М.А. Лобаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, 603087, ул. Академическая, д. 7, г. Нижний Новгород, Россия.

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, д. 46, г. Нижний Новгород, Россия.

\*suroveginaka@ipmras.ru

Методом Ван-дер-Пау с проходом по температуре 100 – 500 К измерены подвижность и концентрация носителей в объемных и дельта-легированных бором слоях алмаза. Метод дельта-легирования монокристаллических эпитаксиальных слоев алмаза атомами бора позволяет наблюдать пространственное разделение дырок и атомов бора и получить слои с повышенной плотностью носителей заряда  $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и повышенной подвижностью  $500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при комнатной температуре. Такое сочетание уровня подвижности и концентрации недостижимо в объемных структурах алмаза.

## Введение

Полупроводниковый алмаз имеет большую запрещенную зону (5.45 эВ), что делает его привлекательным для приборов мощной СВЧ-электроники. Однако существует проблема, связанная с большой энергией активации примесей (наименьшая 0.37 эВ у бора). С этой целью применяется сильное легирование, которое позволяет снизить энергию активации примеси. Компромиссом является дельта-легирование, обеспечивающее высокую концентрацию носителей заряда и высокую подвижность носителей [1]. Для таких слоев уже более десяти лет назад теоретически предсказан эффект разделения носителей тока и легирующих атомов за счет заполнения вышележащих энергетических уровней в квантовой яме, сформированной дельта-слоем [2]. Проявление эффекта разделения дырок и легирующих атомов бора в дельта-слоях и исследование транспортных свойств дельта-слоев представляет большой интерес.

В работе исследуются электрофизические характеристики эпитаксиальных слоев CVD алмаза р-типа в объемно- и дельта-легированных структурах. Это исследование обладает прикладной значимостью для создания приборов алмазной электроники.

## Методика эксперимента

Эпитаксиальные слои алмаза выращивались методом осаждения из газовой фазы - (CVD) методом на подложках НРНТ (high pressure high temperature) алмаза с ориентацией (100) в новом типе CVD реактора [3]. Основными особенностями реактора являются: использование ламинарного безвихрево-

го потока газа и системы быстрой смены состава газовой смеси.

Исследования структур проводились электрофизическими методами. Измерялись вольтамперные характеристики (ВАХ) (система Keithley SCS 4200); удельные и контактные сопротивления – методом длинной линии (TLM), эффект Холла в диапазоне температур 100-500 К.

Для формирования омических контактов был выбран состав Ti/Mo/Au с толщинами слоев Ti – 20 нм, Mo – 30 нм, Au – 100 нм. Напыление отдельных металлических слоев проводилось методом электроннолучевого испарения на установке AMOD.

## Результаты и обсуждение

Была исследована зависимость концентрации и подвижности носителей в серии образцов алмаза с дельта-слоями от концентрации атомов бора в максимуме при комнатной температуре. При концентрации атомов бора в дельта-слое  $< 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  наблюдается низкая подвижность дырок ( $1-20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ), что свидетельствует о протекании тока по дельта-слою. Возрастание подвижности дырок в дельта-слое с концентрации атомов бора  $N_B = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  ( $N_B^{2D} = 1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) до  $500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при комнатной температуре – есть результат пространственного разделения дырок и легирующих атомов бора.

Также был изучен транспорт носителей в объемных и дельта-легированных бором слоях алмаза. С этой целью были исследованы температурные зависимости подвижности и концентрации дырок в легированных структурах алмаза.

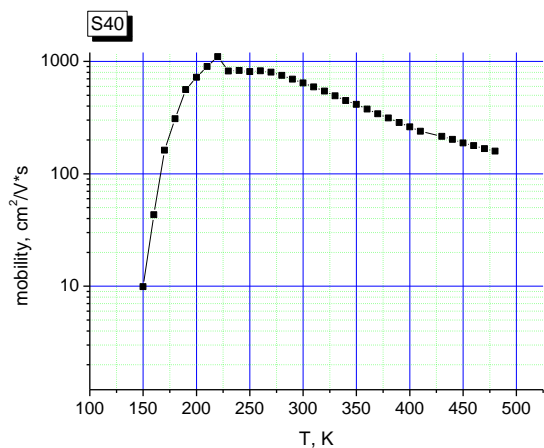


Рис. 1. Температурная зависимость подвижности дырок в слаболегированной подложке алмаза в образце S40

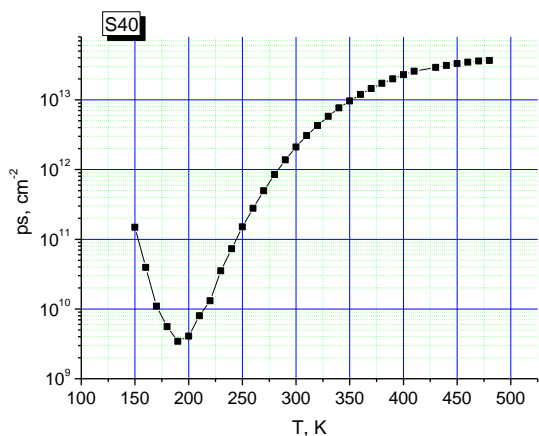


Рис. 2. Температурная зависимость концентрации дырок в слаболегированной подложке алмаза в образце S40

Рис.1 и 2 показывает температурную зависимость концентрации и подвижности дырок в слаболегированной толстой подложке алмаза. Это типичный полупроводниковый характер – подвижность дырок падает с ростом температуры выше 250K из-за возрастания электрон-фононного механизма рассеяния. Концентрация дырок в этом диапазоне растет вследствие термической активации мелких примесных уровней. Температурная зависимость подвижности и концентрации дырок в дельта-легированных структурах (рис.3) выглядит иначе и свидетельствует о более сложном механизме протекания тока, включающем параллельное протекание

носителей в нескольких областях с разной подвижностью и их перераспределение между этими областями при изменении температуры. На рисунке 3 приведены температурные зависимости подвижности дырок в трех идентичных дельта-легированных структурах S45, S08-5, S08-2.

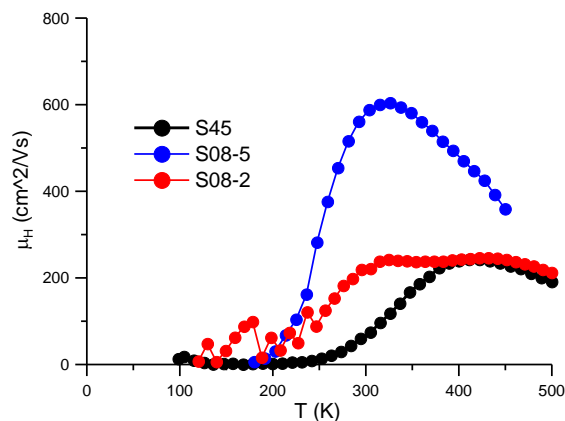


Рис. 3. Температурные зависимости подвижности дырок в структурах S45, S08-5, S08-2

Высокая подвижность носителей при комнатной температуре во всех трех дельта-легированных структурах говорит о пространственном разделении дырок и легирующих атомов бора.

Анализ температурных холловских данных в легированных бором дельта-слоях алмаза свидетельствует о наличии двух каналов токопереноса дырок: по примесной зоне и по валентной зоне.

В работе использовалось оборудование ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

## Литература

1. E.F. Schubert. *Delta-doping of semiconductors*. Cambridge University Press (1996).
2. A. Fiori et al., Simulations of carrier confinement in boron delta doped diamond devices, *Phys. Status Solidi A*, 207 (2010) No.9, 2084.
3. A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, M.A. Lobaev et al., *Phys. Stat. Sol. RRL*, V.10, 324 (2016).



# Моделирование лазерных диодов с длиной волны генерации 3 мкм на основе HgTe/CdHgTe гетероструктур с множественными квантовыми ямами с учетом эффекта горячих фононов

А.А. Афоненко<sup>1,\*</sup>, Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, А.А. Дубинов<sup>2</sup>, В.Я. Алешкин<sup>2</sup>, С.В. Морозов<sup>2</sup>, В.И. Гавриленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*afonenko@bsu.by

В работе предложен лазерный диод на основе нескольких квантовых ям HgTe с зонной структурой, обеспечивающей подавление оже-рекомбинации. Разработана модель учета горячих фононов для расчета неравновесной температуры электронов и дырок. Используя комплексную модель, учитывающую дрейф и диффузию носителей, оже-рекомбинацию и эффекты горячих фононов, показана возможность генерации при комнатной температуре на длине волны  $\lambda \sim 3$  мкм в гетероструктуре HgTe/Cd<sub>0.85</sub>Hg<sub>0.15</sub>Te с квантовыми ямами толщиной 2.2 нм. Найдено, что выходная мощность в импульсе может достигать 1 Вт для импульсов длительностью 1 мкс.

## Введение

Основными ограничивающими факторами для улучшения температурных характеристик лазеров среднего ИК-диапазона являются оже-рекомбинация в квантовых ямах (КЯ), неравновесный нагрев носителей заряда и друдевское поглощение свободными носителями. В настоящей работе на основе подтвержденной возможности стимулированного излучения при оптической накачке [1] и подавленной оже-рекомбинации в КЯ HgTe исследуется возможность генерации при инжекционной накачке.

## Дизайн структуры

Предлагаемая структура основана на нескольких КЯ HgTe толщиной 2.2 нм, помещенных в барьерные слои Cd<sub>0.85</sub>Hg<sub>0.15</sub>Te. Ширина КЯ HgTe подобрана для генерации излучения с  $\lambda = 3$  мкм. Преимуществом узких КЯ является уменьшение количества уровней размерного квантования, что способствует снижению числа каналов оже-рекомбинации. Из-за малой разницы показателей преломления и малой толщины КЯ волноводный эффект оказывается очень слабым. Для увеличения фактора оптического ограничения КЯ, рядом с активной областью предлагается вырастить дополнительный волноводный слой Cd<sub>0.6</sub>Hg<sub>0.4</sub>Te толщиной 400 нм.

## Неравновесный нагрев электронов

«Горячие» электроны и дырки появляются в активной области в процессе их захвата из барьерных областей на локализованные уровни и последующей термализации на нижние уровни КЯ за счет испускания оптических фононов. При взаимодействии электронов с интерфейсными фононными модами плотность вероятности испустить фонон с волновым числом  $q$  составляет

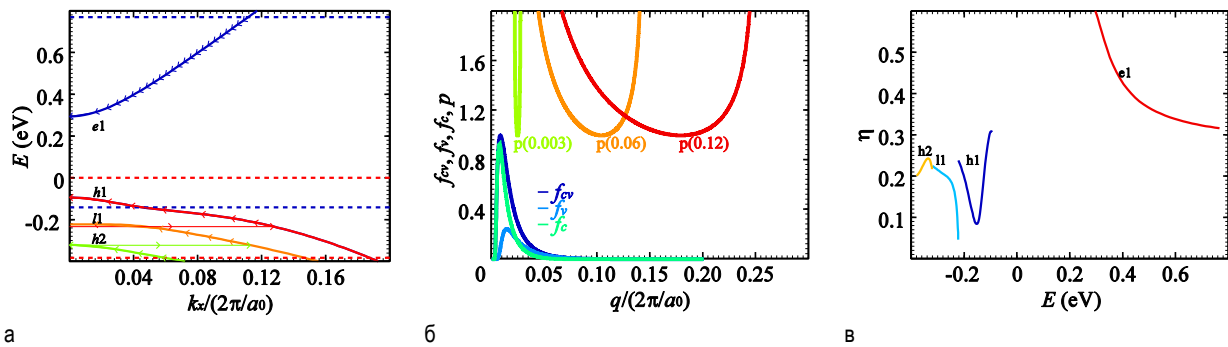
$$p(q) \sim \left( (k_1 + k_2)^2 - q^2 \right) \left( q^2 - (k_1 - k_2)^2 \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – волновые вектора конечного и начального состояния электрона. Эффективность «разогрева» электронов у края зоны фононами с различным  $q$  можно описать весовой функцией

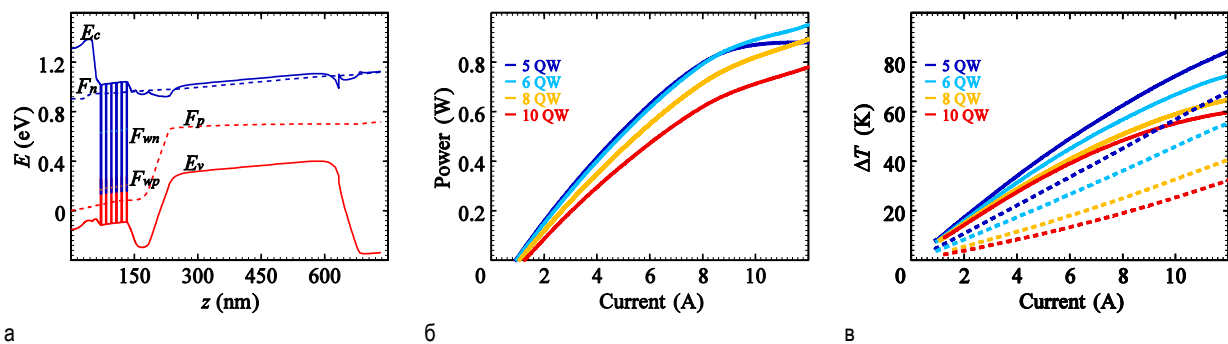
$$f_c(q) = \left( \frac{2m_c \hbar \omega_{LO}}{\hbar^2 q^2} \right) \exp \left[ - \frac{\hbar^2}{2m_c kT} \left( \frac{m_c \hbar \omega_{LO}}{\hbar^2 q} - \frac{q}{2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

Здесь  $m_c$  – эффективная масса электрона,  $T$  – температура,  $\hbar \omega_{LO}$  – энергия оптических фононов. Соответствующая (2) эффективно взаимодействующая с электронами плотность фононных мод есть

$$\rho_{ph} = \int f_c(q) \frac{d^2 q}{(2\pi)^2} \approx \frac{m_c \sqrt{\hbar \omega_{LO} kT}}{\sqrt{\pi \hbar^2}}. \quad (3)$$



**Рис. 1.** Дисперсия электронов и дырок в направлении [013] в КЯ HgTe/Cd<sub>0.85</sub>Hg<sub>0.15</sub>Te толщиной 2.2 нм. Горизонтальные линии показывают энергии краев зоны проводимости (синие штриховые линии) и валентной зоны (красные штриховые линии) КЯ и барьерных слоев (а). Весовая функция для нижних уровней КЯ и ее электронная и дырочная составляющие в зависимости от волнового вектора фотона при  $T = 300$  К и плотность вероятности (ненормированная) испускания волнового вектора фотона электроном с волновым вектором  $k = 0.003, 0.06, 0.12 \times 2\pi/a_0$  ( $a_0$  – постоянная решетки) (б). Зависимость доли испускаемых фотонов, участвующих в термализации носителей у дна зоны, в зависимости от энергии носителей заряда. Подписи e1 обозначают подзоны электронов, h1, h2, l – тяжелых и легких дырок, соответственно (в)



**Рис. 2.** Зонная диаграмма лазерной структуры при прямом смещении. Показаны края зоны проводимости  $E_c$  и валентной зоны  $E_v$ , квазиуровни Ферми для носителей заряда в зонах  $F_n, F_p$  и КЯ  $F_{wn}, F_{wp}$  (а). Средняя выходная мощность (б) и избыточная температура «горячих» носителей заряда в крайних КЯ (в) при накачке импульсами тока длительностью 1 мкс для лазера с резонатором длиной 1 мм и шириной 100 мкм

## Результаты расчетов

Расчеты выполнялись на основе распределенной диффузионно-дрейфовой модели с учетом процессов захвата и выброса носителей на уровни КЯ [2]. Избыточная температура «горячих» электронов и дырок находилась из балансных уравнений для числа фотонов с учетом ур. (1)–(3) (рис. 1).

Выходные характеристики лазера с числом КЯ 5–10 рассчитывались в импульсном режиме при длительности импульса тока накачки 1 мкс (рис. 2). Двухмерный коэффициент оже-рекомбинации при 300 К считался равным  $4.3 \times 10^{-15}$  см<sup>4</sup>/с. В течении импульса происходил нагрев активной области на 90 К, поэтому мгновенная мощность и длина волны генерации уменьшались от начала к концу импульса. При времени жизни оптических фотонов 0.9 пс температура электронов и дырок в КЯ превышала температуру решетки на 60–80 К в зависимости от

числа КЯ. Пороговый ток рос от 0.8 до 1.2 А при увеличении числа КЯ с 5 до 10. Максимальная мощность достигалась в области 12 А и составляла 1 Вт для структуры с 6 КЯ. При этом в течении импульса накачки происходила перестройка длины волны генерации на более, чем 400 нм.

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

## Литература

1. К.Е. Kudryavtsev, V.V. Rumyantsev, V.Ya. Aleshkin *et al.* // Appl. Phys. Lett., 117, 083103 (2020).
2. А. Afonenko, D. Ushakov, G. Alymov *et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 54, 175108-1 (2021).

# Перенос носителей заряда в квантово-каскадных гетероструктурах с участием локализованных донорных состояний

Ан.А. Афоненко<sup>1</sup>, А.А. Афоненко<sup>1,\*</sup>, Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2</sup>, И.С. Васильевский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

<sup>2</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 1115409, Москва, Россия.

\*afonenko@bsu.by

В работе разработана двумерная модель расчета энергий и волновых функций заряженных примесей квантово-каскадных лазерных гетероструктур ТГц диапазона. Рассчитана плотность состояний примесной подзоны в квантовых ямах с учетом случайного распределения примесей. Предложена модель нахождения форм-фактора спектрального уширения для переходов с участием локализованных примесных состояний. Показано, что учет переноса по примесным состояниям приводит к сглаживанию первого резонансного пика вольт-амперной характеристики, связанного с туннелированием электронов с уровня инжектора на нижний лазерный уровень.

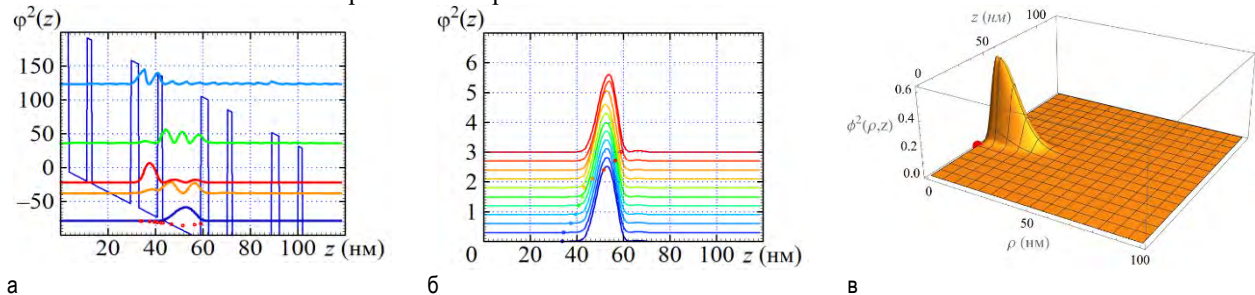
## Введение

Квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона обычно основаны на дизайне, который использует резонансное испускание оптических фононов для опустошения нижнего лазерного уровня. Моделирование структур с помощью балансных уравнений [1] показывает наличие на вольт-амперных характеристиках дополнительного паразитного резонансного пика (при напряжении на одном периоде, соответствующем энергии оптического фонона). На экспериментальных вольт-амперных характеристиках такой резонанс проявляется не так отчетливо. Причина расхождений может быть связана с участием примесей в процессах переноса.

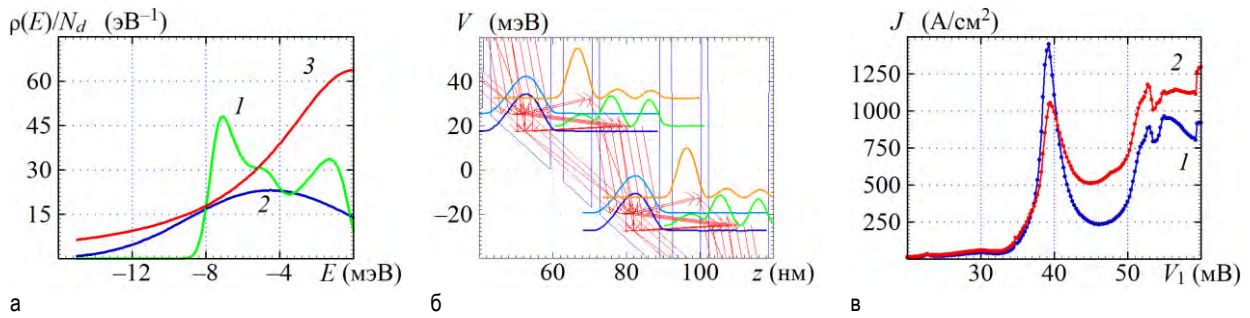
## Расчет примесных состояний

В работе анализировалась структура квантово-каскадного лазера  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  с периодом из 4-х слоев 3.26/7.99/1.90/16.46 нм [2]. Задача нахождения основных состояний заряженной примеси

сводилась к двумерной задаче на собственные значения и собственные вектора и решению уравнение Шредингера в цилиндрических координатах с последующим преобразованием решений, уменьшающих дипольные матричные элементы туннельно-связанных состояний [1]. Одномерные волновые функции одного периода без учета влияния примесей и энергия примесного состояния, полученная в двумерной модели, показаны на рис. 1 а. С учетом экранирования заряд в центре широкой квантовой ямы дает наибольшую энергию активации 8 мэВ (относительно основного уровня широкой квантовой ямы), а в узкой квантовой яме – наименьшую – ~0 мэВ. При этом вне зависимости от положения примеси приведенный к одномерному профиль ее волновой функции (путем интегрирования электронной плотности по радиальной координате) близок к профилю одномерной волновой функции основного состояния широкой квантовой ямы (рис. 1 б, в) [3].



**Рис. 1.** Координатные зависимости (а) квадратов волновых функций одного периода сверхрешетки (точками показаны энергии основного уровня примеси в зависимости от положения заряда), (б) приведенных квадратов волновой функции заряженной примеси при разных положениях заряда (показаны точки) и (в) квадрата двумерной волновой функции основного уровня примеси при расположении примеси в центре узкой квантовой ямы



**Рис. 2.** Нормированная плотность заполненных состояний примесной зоны без учета (1) и с учетом (2) статистического усреднения энергий активации. Также приведена нормированная плотность заполненных состояний основного уровня квантовой ямы при лоренцевском уширении с полушириной 5 мэВ (3) (а). Диаграммы зоны проводимости и квадраты волновых функций электронов при напряжении на одном периоде 45 мВ (б). Стрелки обозначают каналы переноса зарядов. Рассчитанная вольтамперная характеристика структуры при температуре 77 К без учета (1) и с учетом (2) переноса через примесную зону (в)

### Форм-фактор спектрального уширения для отдельных примесей

Координатную зависимость двумерной волновой функции примеси (рис. 1 б, в) можно приближенно представить в виде:

$$\phi(z, \rho) = \phi_1(z) \phi_{\text{imp}}(\rho), \quad (1)$$

где  $\phi_1(z)$  – волновая функция первого уровня квантовой ямы,  $\phi_{\text{imp}}(\rho) = \sqrt{2/\pi a^2} \exp(-\rho/a)$  – волновая функция двумерной примеси,  $a$  – радиус примеси. Считая, что волновые функции других подзон не изменились и имеют вид модулированных плоских волн  $\phi_i(z, \mathbf{\rho}) = \phi_i(z) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{\rho})$ , квадраты матричных элементов могут быть получены в одномерном приближении с дополнительным множителем аналогично межзонным переходам в модели без правила отбора [4]

$$F(k) = \frac{8\pi a^2}{A(1+a^2k^2)^3}. \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{k}$  – волновой вектор состояния подзоны,  $A$  – площадь квантово-размерного слоя. При интегрировании (2) по фазовому пространству удобно перейти к энергии

$$F(k) \frac{Ad^2k}{(2\pi)^2} = \frac{2\gamma^2 dE}{(\gamma + E)^3} = F(E) dE, \quad (3)$$

где  $\gamma = \hbar^2/2m_c a^2$ ,  $m_c$  – эффективная масса. Для рассчитанных радиусов примеси 10–15 нм полуширина форм-фактора  $0.13\gamma$  попадает в диапазон 0.7–1.5 мэВ. Это значительно меньше, чем уширение, связанное с вариацией энергии активации примесей в зависимости от ее положения (рис. 2 а).

### Плотность состояний примесной зоны и перенос носителей

Большой разброс энергий активации примеси приводит к появлению широкой примесной зоны (рис. 2 а). Рассчитанный параметр статистического уширения из-за взаимодействия с соседними примесями составил 3.5 мэВ. Перенос заряда с участием примесной зоны можно учесть с использованием значительных хвостов плотности состояний (для лоренцевской формы основного уровня параметр уширения  $\sim 5$  мэВ), либо вводя в балансные уравнения дополнительную зону. При этом возникает значительный канал переноса заряда с инжектора в примесную зону и далее на нижний лазерный уровень (рис. 2 б). Это приводит к сглаживанию первого фононного резонанса на вольтамперных характеристиках (рис. 2 в), что особенно существенно при низких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-30020.

### Литература

1. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов *и др.* // Квантовая электроника, Т. 49, № 10, 913 (2019).
2. M. Bosco, M. Franckie, G. Scaliari *et al.* // Appl. Phys. Lett., V. 115, No. 1, 010601 (2019).
3. Ан.А. Афоненко, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков // Квантовая электроника: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 22–26 ноября 2021 г. / Минск: БГУ, 249 (2021).
4. А.А. Афоненко, В.К. Кононенко, И.С. Манак, В.А. Шевцов // ФТП, Т. 31, № 9, 1087 (1997).

# Наномасштабный монокристаллический карбид кремния на кремнии и его уникальные свойства

Н.Т. Баграев<sup>1,2</sup>, С.А. Кукушкин<sup>1,\*</sup>, А.В. Осипов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), Большой пр. В.О., д. 61, Санкт-Петербург, 199178.

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, д. 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*sergey.a.kukushkin\_s@gmail.com

Приводится обзор последних достижений в области роста эпитаксиальных пленок SiC на Si методом согласованного замещения атомов. Кратко излагаются основные положения нового метода синтеза эпитаксиальных пленок SiC на Si. Отличительным свойством пленок SiC, синтезированных данным методом, является образование в нем избыточной концентрации кремниевых вакансий, в то время как в SiC, выращиваемом по стандартным методикам, присутствуют в основном вакансии углерода. Методами квантовой химии и экспериментально показано, что при температурах синтеза ~1350°C в SiC на Si образуются, так называемые C4V центры. Расчёты, выполненные методом теории функционала плотности, показали, что C4V центры обладают магнитным моментом, равным магнетону Бора  $\mu_B$ , и приводят к спиновой поляризации в SiC. Обнаружено, что благодаря присутствию углеродно-вакансионных структур в SiC, при комнатной температуре в слабых магнитных полях возникает гистерезис статической магнитной восприимчивости и осцилляций Ааронова–Бома. Впервые обнаружено электролюминесцентное излучение в среднем и дальнем ИК-диапазоне излучающееся из наноструктур SiC на Si. Спектры электролюминесценции, полученные в терагерцовом частотном диапазоне, 3.4 и 0.12 ТГц.

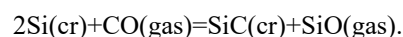
## Введение

В последние годы резко вырос интерес к таким полупроводникам, как карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), нитрид алюминия (AlN), оксид цинка (ZnO). Для получения этих полупроводников следует иметь основу (подложку), на которой нужно вырастить пленку, например, нитрида галлия. Многочисленные исследования показали, что различие между кристаллическими структурами пленки и подложки не должно превышать 4%. В противном случае, в пленках образуется много дефектов, в частности дислокаций, которые приводят к резкому ухудшению электрических свойств пленок. Одной из наиболее подходящих подложек, производство которой хорошо освоено во всем мире, является кремниевая подложка (Si). Однако, параметры решетки Si подложки и параметры решеток широкозонных материалов таких как: SiC, GaN, AlN и ZnO отличаются более чем на 20%. Это существенно сдерживает интеграцию этих материалов в кремниевую электронику. Одним из путей, решения этой проблемы является создание тонкого буферного слоя SiC на поверхности Si, поскольку параметры решетки SiC лишь незначительно отличаются от параметров решеток GaN и AlN. Однако, при этом встает другая, не менее сложная проблема. Как и каким образом вырастить никодефектный слой SiC на Si? Ведь параметры решеток Si и SiC

отличаются друг от друга на 19%. Решению этого вопроса и посвящено данное сообщение.

## Метод согласованного замещения атомов – новый метод синтеза эпитаксиальных пленок SiC на Si

Для решения этой проблемы в работе [1] был теоретически предсказан и экспериментально подтвержден новый метод получения эпитаксиальных пленок nano-SiC на Si, так называемый метод согласованного замещения атомов. Данный метод роста nano-SiC принципиально отличается от всех существующих на сегодняшний день способов и технологий выращивания монокристаллов, пленок и наноструктур. Метод заключается в согласованном замещении части атомов матрицы кремния на атомы углерода с образованием эпитаксиальной пленки карбида кремния. В основе этого метода лежит «сборка» новой матрицы карбида кремния на основе старой матрицы кремния путем частичной замены кремниевых атомов, находящихся в кристаллической матрице подложки на атомы углерода. «Сборка» матрицы SiC осуществляется за счет химической реакции



В [1] было доказано, что эта реакция протекает в две стадии. На первой стадии образуется промежуточное соединение – активированный комплекс



"кремниевая вакансия–атом углерода–матрица–кремния" ( $C-V_{Si}$ ). Атомы углерода на этой стадии располагаются в межузельных позициях кремниевой матрицы. На втором этапе реакции активированный комплекс переходит в карбид кремния, а освободившиеся вакансии сливаются в поры, образующиеся под слоем карбида кремния. В кристалле кубической симметрии эти два центра дилатации (атом углерода и кремниевая вакансия) упруго взаимодействуют друг с другом. Если дилатационные диполи расположены перпендикулярно плоскости (111) кремния, то они притягиваются друг к другу [1]. При этом практически вся упругая энергия, возникшая из-за внедрения атома углерода и образования вакансии, релаксирует. После завершения химического превращения механические диполи, выполнившие свою роль, распадаются на пленку карбида кремния и поры под ее поверхностью. Ориентацию пленки при этом задает «старая» кристаллическая структура исходной матрицы Si, а не только поверхность подложки, как это обычно реализуется в традиционных методиках выращивания пленок. По сути дела, впервые реализованы условия, при которых, самосогласованным образом происходит последовательная замена атомов одного сорта, атомами другого сорта внутри исходного кристалла без разрушения его кристаллической структуры. В докладе подробно излагаются термодинамика и кинетика процесса замещения атомов в твердой фазе.

### **Избыточная концентрация кремниевых вакансий – основной отличительный признак SiC, синтезированного методом замещения атомов**

Показано, что основным отличительным свойством пленок SiC, синтезированных данным методом, является образование в нем избыточной концентрации кремниевых вакансий, в то время как в SiC, выращиваемом по стандартным методикам, присутствуют в основном вакансии углерода. Обнаружено, что взаимодействие углеродных атомов и кремниевых вакансий приводит к образованию слоев SiC, упорядоченных ансамблей углеродно-вакансионных структур. Подобные структуры образуются как вследствие химической реакции замещения, так и вследствие усадки кристаллической ячейки Si при ее превращении в кристаллическую ячейку SiC. Присутствие углеродно-вакансионных структур в SiC приводит к образованию в нем целого ряда новых уникальных свойств.

### **SiC на Si — новый материал для спинтроники**

Экспериментально, методами рамановской спектроскопии и спектроскопической эллипсометрии обнаружено образование в SiC кластеров, состоящих из 4 атомов C и пустот, расположенных непосредственно под ним. Данное стабильное состояние вакансии по аналогии с NV центрами в алмазе обозначено как  $C_4V$  центр. Расчеты, выполненные методами теории функционала плотности, показали, что  $C_4V$  центры обладают магнитным моментом, равным магнетону Бора  $\mu_B$ , и приводят к спиновой поляризации в SiC [3].

На границе раздела SiC-Si обнаружен слой Si обладающий электронными свойствами «полуметалла» [3]. Показано, что углеродно-вакансионные структуры приводят к уникальным оптическим, электрическим и магнитным свойствам [3]. В частности, при комнатной температуре обнаружено возникновение в слабых магнитных полях двух квантовых эффектов – гистерезиса статической магнитной восприимчивости и эффекта возникновения осцилляций Ааронова–Бома в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости [4]. Первый эффект связывается с эффектом Мейснера–Оксенфельда [4]. Обнаружено электролюминесцентное излучение в среднем и дальнем ИК-диапазоне излучающееся из наноструктур SiC на Si. Спектры электролюминесценции, полученные в терагерцовом частотном диапазоне, 3.4 и 0.12 ТГц [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда РФ № 20-12-00193

### **Литература**

1. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov // J. of Phys. D: Appl. Physics, V. 47. 313001 (2014).
2. S.A. Kukushkin and A.V. Osipov // Materials, V. 14. 78 (2021).
3. S.A. Kukushkin and A.V. Osipov // Materials, V. 2021. 14. 5579.
4. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, В.В. Романов, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.С. Хромов // ФТП, Т. 55, 103 (2021).
5. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.С. Хромов // ФТП, Т. 55, 1027(2021).

# Электрoлюминесценция гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs выращенными методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках Ge/Si

Н.В. Байдусь<sup>1,\*</sup>, В.Я. Алешкин<sup>2</sup>, С.М. Некоркин<sup>1</sup>, А.В. Новиков<sup>2</sup>, И.В. Самарцев<sup>1</sup>, Д.В. Юрасов<sup>2</sup>, П.А Юнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ННГУ им. Н.И.Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, 603087.

\*bnv@nifti.unn.ru

Представлены результаты исследования электрoлюминесценции гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs. Гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на подложках Ge/Si выращенными методом МЛЭ. На основе гетероструктур с тремя слоями КТ InAs/GaAs изготовлены светоизлучающие диоды и исследованы их излучательные свойства. При комнатной температуре и малом токе инжекции наблюдается сверхлинейная зависимость интегральной интенсивности ЭЛ от тока инжекции. Сверхлинейность объясняется повышенной скоростью безызлучательной рекомбинации в структурах, выращенных на кремниевых подложках в сравнении со структурами, выращенными на подложках GaAs.

В настоящее время в мире развиваются исследования в области гибридных лазеров, когда лазерная структура на основе полупроводников АЗВ5 выращивается на кремниевой подложке [1]. Такой лазер необходим для оптических межсоединений в области длин волн прозрачности объемного кремния. В качестве активной среды часто используются квантовые точки (КТ) InAs, т.к. они менее чувствительны к дефектам структуры в сравнении с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs/GaAs [2].

Данная работа посвящена изготовлению и исследованию электрoлюминесценции (ЭЛ) светодиодов с многослойными КТ на подложках GaAs и Ge/Si (001).

## Методика эксперимента

Светоизлучающие гетероструктуры (ГС) выращивали методом МОС-гидридной эпитаксии на установке AIX 200RF на подложках GaAs(100) и GaAs/Ge/Si(100). Источниками элементов являлись триметилгаллий, триметилиндий, триметилалюминий и арсин. Технология роста методом МЛЭ и характеристики подложек Ge/Si приведены в [2]. На Ge/Si предварительно выращивали буферный слой GaAs с зародышевым слоем  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  (подробнее см. в [3]). Рост GaAs включает в себя три циклических отжига и 10 КЯ InGaAs в качестве дислокационного фильтра. Для данного опыта методом рентгеновской дифракции (РД) была отобра-

на подложка кремния с отклонением  $0,2^\circ$  от  $\langle 100 \rangle$  в направлении  $\langle 110 \rangle$ . Плотность антифазных границ (АФГ) составляла менее  $0,1 \text{ мкм}^{-1}$ . Светоизлучающая часть ГС состоит из буферного слоя GaAs, барьерного слоя  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ , волноводного слоя GaAs толщиной 300 нм в середине которого находятся 3 слоев КТ и поверхностного барьера AlGaAs (300нм). КТ InAs выращены методом циклического субмонослойного осаждения [4]. Температура осаждения КТ составляла  $500^\circ\text{C}$ .

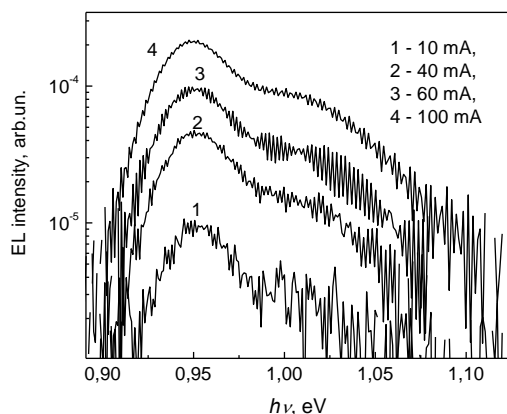
Из гетероструктур на подложках GaAs и Ge/Si были изготовлены образцы светоизлучающих диодов с кольцевыми контактами. Окно для выхода излучения имеет диаметр 1 мм, наружный диаметр золотого кольца 2мм. Контакты AuGe/Ni/Au к верхнему слою p-GaAs наносили методом термического напыления в вакууме. Диоды изготовили методом фотолитографии с применением двух фотошаблонов и последующего химического травления золота, и двух травлений для изготовления мезоструктуры.

Второй омический контакт к буферному слою GaAs n-типа осуществляли путем искрового вжигания оловянной фольги.

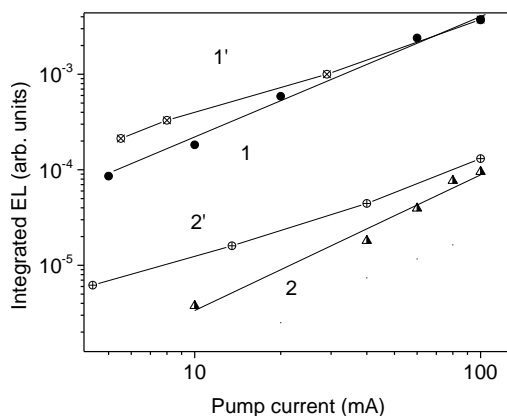
Электрoлюминесценцию измеряли при модуляции импульсами тока частотой повторения 300 Гц и скважностью 0,5. Излучение выводилось с окна 1 мм в диаметре.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены типичные спектры ЭЛ (300К) светоизлучающего диода на подложке Ge/Si при токах инжекции 10–100 мА. Спектры ЭЛ при этом практически повторяют спектральные зависимости ФЛ измеренные при 300 К.



**Рис. 1.** Спектральные зависимости ЭЛ (300К) светоизлучающего диода с 3 слоями КТ, выращенного на Ge/Si



**Рис. 2.** Зависимости ИЭЛ КТ InAs/GaAs от тока накачки светодиодов на подложках GaAs (1, 1') и Ge/Si (2, 2') измеренных при 300К (1, 2) и 77К (1', 2')

Спектры ЭЛ измеряли диодах на основе обоих типов подложек (GaAs и GaAs/Ge/Si) при 300 и 77К интегрировали для последующего количественного анализа. На рис. 2 показаны графики интегральной зависимости интенсивности ЭЛ (ИЭЛ) в логарифмических координатах от инжектируемого тока.

Следует заметить, что максимальный в данных условиях измерений ток 100мА соответствует плотности тока инжекции 1,43А/см<sup>2</sup>.

При 77 К образцы обоих типов имеют линейную зависимость IEL от тока, т.е. показатель степени равен 1 (графики 1 и 2). Напротив, при комнатной температуре при 300К наблюдается сверхлинейная зависимость IEL от тока накачки: показатель степени равен 1,5 для подложки Ge/Si (график 2') и 1,3 для подложки GaAs (график 1').

Как известно [5], сверхлинейная зависимость (показатель степени между 1 и 2) связана с уменьшением вклада безызлучательной рекомбинации в сравнении с излучательной по мере роста тока. В данном случае можно сделать вывод о том, что ГС КТ, выращенные на Ge/Si подложках характеризуются большей концентрацией центров безызлучательной рекомбинации в сравнении с ГС на GaAs подложках. Следует также заметить, что температурное гашение люминесценции не очень велико, и оно исчезает при повышении тока инжекции, что свидетельствует об удовлетворительном качестве структур (а точнее массива КТ).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-29-20016).

## Литература

1. J. C. Norman, D. Jung, Y. Wan *et al.* // APL Photonics, V. 3, 030901 (2018).
2. V. Ya. Aleshkin, N. V. Baidus, A. A. Dubinov *et al.* // Appl. Phys. Lett., V. 109, 061111 (2016).
3. А. В. Рыков, Р. Н. Крюков, И. В. Самарцев и др. // ПЖТФ, Т. 47, вып.8 (2021).
4. В. Я. Алёшкин, Н. В. Байдусь, А. А. Дубинов и др. // ФТП, Т.53, вып.8 (2019).
5. N. F. Hasbullah, J. S. Ng, H. Y. Liu *et al.* // IEEE J. Quantum electronics, V.45, pp.79-81, (2009).

# Многофононная релаксация парасостояний триплета $1s$ в нейтральных донорах магния в кремнии

Н.А. Бекин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*nbekin@ipmras.ru

Теоретически исследуется темп многофононной релаксации парасостояний триплета  $1s(T_2)$  в  $Si:Mg^0$ . Для расчетов используется адиабатическое приближение, что предполагает игнорирование вырождения уровня  $1s(T_2)$ . Вместе с тем учитывается многодолинный характер волновых функций и рассеяние на внутри- и междолинных фононах.

## Введение

Разность энергий между триплетом и основным состоянием (66 мэВ) превышает энергию оптического фонона, поэтому законом сохранения энергии одноквантовые процессы релаксации с этого уровня запрещены. Поскольку этот уровень играет важную роль в релаксации неравновесных электронов, в данной работе рассматривается вопрос о скорости его многофононной релаксации.

## Метод расчета

Для расчета вероятностей релаксационных процессов использовались следующие модельные представления. Задача решалась в одноэлектронном приближении для электрона в поле однозарядного иона. В отличие от проведенных ранее расчетов учитывался многодолинный характер волновых функций, но с изотропной эффективной массой  $m = 0.32m_0$  в каждой долине, равной эффективной массе плотности состояний. Для начального и конечного состояний использовалась волновая функция  $1s$ -типа, полученная методом квантового дефекта. Вероятность находилась с использованием подхода [1], который эквивалентен адиабатическому приближению. Использование этого подхода предполагает игнорирование вырождения триплета. Строго говоря, для вырожденного уровня могут

играть существенную роль эффекты вибронного взаимодействия, которые приводят к смешиванию затравочных электронных состояний этого уровня и формированию электронно-колебательных состояний с определенной симметрией [2].

Кроме того, в расчетах использовалось то обстоятельство, что энергия связи донора магния сравнительно невелика (107 мэВ). Это позволяет приближенно считать, что масштаб локализации волновых функций электронов в импульсном пространстве мал по сравнению с размерами зоны Бриллюэна. Это, в частности, позволяет использовать для констант электрон-фононного взаимодействия их табличные данные. В вероятность многофононного перехода учитывается вклад всех внутридолинных и междолинных фононов. Для этого используется метод генерирующих функций, описанный, в частности, в работе [1]. Расчеты будут завершены к началу конференции.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 19-72-20163).

## Литература

1. R. Pässler. // Czech. J. Phys. B, V. 24, 322 (1974).
2. I. B. Bersuker. The Jahn-Teller Effect (Cambridge University Press, United Kingdom, 2006).

# Температурные зависимости мощностных и спектральных характеристик квантово-каскадных лазеров с частотами от 2.3 до 4.1 ТГц

Д.А. Белов<sup>1,\*</sup>, А.В. Иконников<sup>1</sup>, С.С. Пушкарёв<sup>2</sup>, Р.Р. Галиев<sup>2</sup>, Д.С. Пономарёв<sup>2</sup>,  
Д.Р. Хохлов<sup>1</sup>, С.В. Морозов<sup>3</sup>, В.И. Гавриленко<sup>3</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2, 4</sup>

<sup>1</sup> Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105.

<sup>3</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*belov.da17@physics.msu.ru

Проведены исследования мощностных и спектральных характеристик квантово-каскадных лазеров (ККЛ) на основе активной области из GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As, излучающих на частотах 2.25(А), 2.27(В), 3.2(С) и 4.1(Д) ТГц. Исследуемые ККЛ имели двойной металлический волновод из золота и работали в импульсном режиме с длительностями 5 – 15 мкс и частотой повторения 1 кГц. Измерены температурные зависимости интегральной выходной мощности ККЛ, позволившие изучить возможные механизмы температурной деградации по методике, предложенной в работе [1]. Кроме того, измерены спектры излучения лазеров как при фиксированных рабочих точках (лазеры А и В), так и со сканированием по току (лазеры С и Д) в широком диапазоне температур от 5 до 120 К, что позволило определить коэффициент температурного дрейфа частоты излучения. Полученные результаты представляются полезными для изысканий, направленных на повышение максимальных рабочих температур ККЛ.

## Введение

Развитие зонных дизайнов активной области и волноводов с низким уровнем потерь позволило продемонстрировать в 2020 году квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона (ТГц ККЛ), работающие до 250 К (около -23 °С) с охлаждением на однокаскадном элементе Пельтье [2]. Ключом к созданию ТГц ККЛ, работающих при комнатной температуре, является понимание механизмов температурной деградации в таких лазерах. В данной работе были исследованы температурные зависимости мощностных и спектральных характеристик в ТГц ККЛ с резонансно-фононным дизайном для определения доминирующих механизмов деградации при высоких температурах.

## Результаты и обсуждение

В работе исследовались ККЛ, изготовленные в ИСВЧПЭ РАН на основе активной области GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As в структуре с двойным металлическим волноводом Au-Au, излучающие на частотах 2.25(А), 2.27(В), 3.2(С) и 4.1(Д) ТГц. Измерения характеристик ККЛ проводились в импульсном режиме с длительностями импульсов 5 – 15 мкс и частотой повторения 1 кГц. В экспериментах использовались фурье-спектрометр Bruker

Vertex 70v и кремниевый болометр. Для оптического согласования лазера с измерительным оборудованием использовалась металлическая трубка, которая исполняла роль волновода.

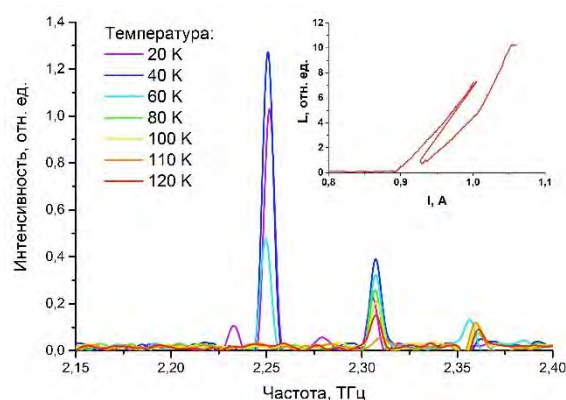
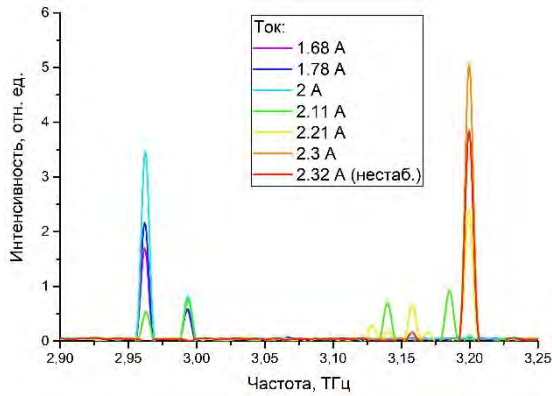


Рис. 1. Спектры излучения лазера (А) при температурах от 20 до 120 К, измеренные при токе 1.13 А с параметрами импульса 15 мкс / 1 мс. На вставке: зависимость интегральной выходной мощности лазера (А) от рабочего тока с параметрами импульса 9 мкс / 50 мс. Спектры соответствуют первому максимуму на зависимости L(I)

Были проведены измерения температурных зависимостей максимальной выходной мощности ККЛ с целью анализа механизмов температурной дегра-



дации изучения по методике, предложенной в [1]. Рассмотрим полученные результаты на примере лазера (А) (спектры лазера (В) оказались почти полностью аналогичными спектрам лазера (А)).



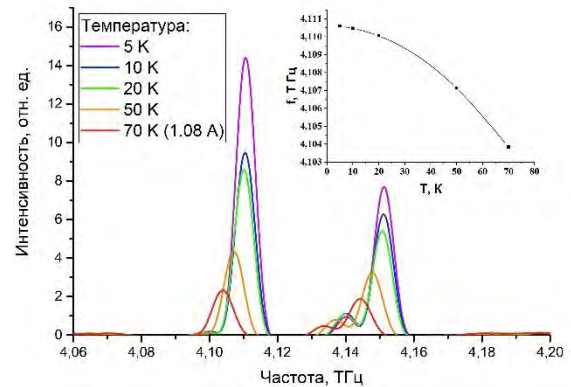
**Рис. 2.** Спектры излучения лазера (С) в различных рабочих точках при температуре 7 К с параметрами импульса 5 мкс / 1 мс

Построенные в соответствии с [1] графики Аррениуса нормированной выходной мощности от температуры показали, что у доминирующего механизма деградации в исследуемых лазерах энергия активации меньше, чем разница энергий оптического фона и ТГц фотона. Это означает, что данный механизм связан не с испусканием оптического фона, как было предложено в [1], а с конструкцией лазера либо с особенностями процесса измерений. Установление природы этого механизма является темой для дальнейших исследований.

Наибольший интерес для дальнейших исследований вызывают спектры лазера (С), представленные на рисунке 2, где отчетливо наблюдаются два диапазона спектральных линий, которые разделены интервалом около 200 ГГц. Такой характер генерации возможен при наличии в модуле усиления двух излучательных переходов с близкими дипольными моментами. Генерация на двух оптических переходах, отстоящих достаточно далеко друг от друга ( $\Delta E \sim 2.5$  мэВ), позволит подробнее рассмотреть

особенности проявления механизмов деградации на разных частотах в рамках одного лазера.

Кроме того, на примере спектров ККЛ (D), представленных на рисунке 3, была рассмотрена температурная зависимость частоты излучения для моды 4.11 ТГц. При увеличении температуры максимум основной спектральной линии смещался в сторону меньших частот из-за температурной зависимости показателя преломления активной среды лазера. Подобная нелинейная зависимость неоднократно встречается в литературе.



**Рис. 3.** Спектры излучения лазера (D) при температурах от 5 до 70 К, измеренные при токе 1.03 А с параметрами импульса 10 мкс / 1 мс. На вставке: температурный дрейф частоты излучения основной моды (4.1 ТГц). Полная перестройка частоты 6.76 ГГц

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-72-30020. Д. А. Белов благодарит за поддержку фонд «БАЗИС» (грант № 21-2-9-45-1).

## Литература

1. A. Albo, Q. Hu // Applied Physics Letters, 106, 131108 (2015).
2. A. Khalatpour *et al.* // Nat. Photonics, 15, 16-20 (2021).

# Взаимодействие экситонов со светом в мезоскопических структурах

А.В. Белоновский<sup>1, 2, \*</sup>, К.М. Морозов<sup>1, 2</sup>, Е.И. Гиршова<sup>1, 2</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1, 2, 3</sup>

1 Санкт-Петербургский Академический Университет, улица Хлопина, 8, к. 3, лит. А. Санкт-Петербург, 194021.

2 Санкт-Петербургский Университет ИТМО. Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101.

3 Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*belonovskii@spbau.ru

Объемный материал характеризуется непрерывным спектром состояний, в то время как в микрорезонаторах взаимодействие излучателя может осуществляться с одной оптической модой. В работе рассмотрены структуры, занимающие промежуточное положение между объемными материалами и микрорезонаторами (мезорезонаторы). В мезорезонаторах осуществляется взаимодействие экситона одновременно с несколькими оптическими модами, критерием чего являются сравнимые величины силы взаимодействия света и вещества (расщепления Раби) и энергетического интервала между модами резонатора.

## Введение

Мезоскопическая физика является активно развивающейся в последнее время областью, в которой рассматриваются свойства систем на масштабах промежуточных между макроскопическим и микроскопическим. В случае электронов в твердом теле, рассмотрение мезоструктур (структур, размер которых сравним с длиной когерентности для электронов) привело к открытию новых эффектов, таких как эффект Ааронова-Бома и Универсальные флуктуации проводимости.

По аналогии с электронами в твердом теле, появляется актуальным вопрос, существуют ли мезоскопические эффекты при взаимодействии света с веществом?

Одной из основных характеристик микрорезонатора является существование одной высокодобротной фотонной моды, которая взаимодействует с экситоном. Энергетический интервал в таких структурах намного больше чем величина расщепления Раби. В объемных же материалах имеет место непрерывный спектр мод. Однако мало внимания было уделено промежуточному случаю, а именно рассмотрению мезорезоструктур – структур, занимающих промежуточное положение между микрорезонаторами и объемными материалами [1, 2, 3].

## Теория

Для теоретического описания взаимодействия одной экситонной моды с несколькими фотонными модами рассмотрим модельную систему, состоящую из одной экситонной моды с энергией  $\hbar\omega_0$  и не-

скольких фотонных мод с энергией  $\hbar\omega_k$ . Гамильтониан, описывающий взаимодействие экситона в полости с оптическими модами резонатора и экситон-экситонное взаимодействие, имеет вид:

$$\hat{H} = \hbar\omega_0\hat{x}^+\hat{x} + \sum_k \hbar\omega_k\hat{a}_k^+\hat{a}_k + \sum_k \hbar g_k(\hat{a}_k^+\hat{x} + \hat{a}_k\hat{x}^+) + \hbar U\hat{x}^+\hat{x}^+\hat{x}\hat{x}, \quad (1)$$

где  $\hat{x}^+$ ,  $\hat{a}_k^+$  ( $\hat{x}$ ,  $\hat{a}_k$ ) – операторы рождения (уничтожения) экситонна и фотона соответственно. Для операторов  $\hat{a}_k^+$ ,  $\hat{a}_k$ ,  $\hat{x}^+$ ,  $\hat{x}$ , будут справедливы коммутационные соотношения для бозонов  $[\hat{a}_k, \hat{a}_k^+] = 1$  и  $[\hat{x}, \hat{x}^+] = 1$ .

При наличии диссипации система модернизируется до описания системы с помощью Лиувиллиана для матрицы плотности с членами, отвечающими за диссипацию:

$$\partial_t \hat{\rho} = \hat{L} \hat{\rho} \quad (2)$$

Благодаря данному уравнению можно составить систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику населённости фотонных и экситонных мод.

Экситоны и моды резонатора образуют смешанные состояния фотонов и экситонов (поляритонов), и систему иногда удобно описывать в поляритонной базе. Количество частиц в поляритонной моде можно получить, с помощью диагонализации гамильтониана (1.1), учитывая, что ( $U \ll gk$ ):

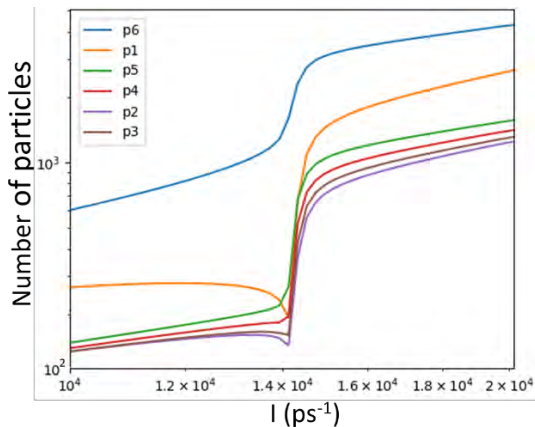
$$p_i = \langle \hat{p}_i^+ \hat{p}_i \rangle = |c_{0i}|^2 n_{xx} + \sum_k c_{0i} c_{ki}^* (n_{xk} + n_{kx}) + \sum_{k,k'} c_{ki} c_{k'i}^* n_{kk'}, \quad (3)$$

где  $n_{xx} = \langle \hat{x}^+ \hat{x} \rangle$  – среднее значение числа экситонов,  $n_{xi} = \langle \hat{x}^+ \hat{a}_i \rangle = n_{ix}^*$  и  $n_{ij} = \langle \hat{a}_i^+ \hat{a}_j \rangle$  ( $i \neq j$ ) – зна-

чения в смешанных состояниях. Количество фотонов в моде  $i$  описывается выражением  $n_{ii} = \langle \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_i \rangle$ .  $p_i$  – среднее количество поляритонов в моде  $i$ ,  $c_{ij}$  – элемент матрицы перехода в поляритонный базис. Коэффициент  $|c_{0i}|^2$  – является экситонным вкладом в поляритонную моду.

## Поляритонная бистабильность

Рассмотрим систему, состоящую из пяти фотонных мод и одной экситонной моды и рассчитаем зависимость населенности поляритонных мод от накачки для данной системы. На рисунке 1 показаны зависимости населенности поляритонных мод в мезорезонаторе, поддерживающем пять фотонных мод, взаимодействующих с экситонной модой при наличии экситон-экситонного взаимодействия, характеризуемого константой взаимодействия  $U = 12.86 \cdot 10^{-6} \omega_0$  (Если энергия экситона  $\omega_0 = 3.5$  эВ, то  $U = 45$  мкэВ [4]).



**Рис. 1.** Зависимость населенности поляритонных мод от накачки

Как видно из рисунка 1, система демонстрирует бистабильное поведение. Величина петли гистерезиса сильно зависит от величин диссипации экситонной и фотонных мод. С увеличением диссипации петля гистерезиса уменьшается. Поведение населенности

поляритонных мод от накачки демонстрирует пороговое поведение. При достаточно низких значениях накачки зависимость заселенности поляритонов от накачки очень слабая. Когда накачка достигает определенного порогового значения, заселенность поляритонных мод резко возрастает, а затем растет гораздо быстрее. Это поведение аналогично поведению населенностей, которое получается путем решения квазиклассических уравнений Больцмана.

Поляритонные моды на рисунке 1 пронумерованы по возрастанию энергии. То есть мода p1 имеет самую низкую энергию, а мода p6 самую высокую. Как можно видеть из рисунка 1, для мод с низкой энергией наблюдается немонокотонная зависимость населенности от накачки. Данный эффект наблюдается для поляритонных мод p1, p2 и p3. При этом, чем меньше энергия моды, тем сильнее данный эффект. Для моды в основном состоянии p1 немонокотонная зависимость выражена наиболее сильно.

Поляритонная бистабильность является одним из самых интересных эффектов в поляритонике, который часто рассматривается как базовый принцип построения будущих систем обработки поляритонной информации. Такая дополнительная нелинейная зависимость, продемонстрированная в данной работе, может быть использована для расширения диапазона применения поляритонов.

## Литература

1. A. V. Belonovski *et al.* // *Optics Express*, V. 29, no. 13, pp. 20724-20734 (2021).
2. A. V. Belonovski *et al.* // *Optics Express*, V. 28, no. 9, pp. 12688-12698 (2020).
3. G. Pozina *et al.* // *Physica Status Solidi A*, V. 217, no. 14, 1900894 (2020).
4. A. Baas *et al.* // *Physical Review A*, V. 69, P. 023809 (2004).

# Структуры Au/GaAs(001) с нанокластерами золота: создание, диагностика, спектроскопия анизотропных плазмонов

В.Л. Берковиц<sup>1</sup>, В.А. Кособукин<sup>1</sup>, В.П. Улин<sup>1</sup>, П.А. Алексеев<sup>1</sup>,  
Ф.Ю. Солдатенков<sup>1</sup>, В.С. Левицкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт Петербург, 194021.

<sup>2</sup> НТЦ Тонкопленочных технологий, ул. Политехническая, 28, Санкт Петербург, 194021.

\*vladimir.berkovits@mail.ioffe.ru

Созданы структуры Au/N/GaAs(001) с интерфейсом в виде монослоя атомов азота, химически связанных с атомами галлия кристалла. При отжиге таких структур на поверхности кристалла образуются нанокластеры золота, которые имеют вытянутую форму и ориентированы в направлении  $[1\bar{1}0]$ . При этом в спектрах нормального отражения поляризованного света появляются резонансные особенности, частота, ширина и интенсивность которых существенно зависят от поляризации. Теоретически показано, что эти особенности обусловлены плазмонами, локализованными в нанокластерах Au, которые обладают сильной анизотропией формы и ориентации относительно направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$  подложки GaAs(001).

## Введение

Структуры Au/GaAs с нанокластерами золота, выращенными на поверхности полупроводника, обладают большим потенциалом для приложений в нанозлектронике и наноплазмонике. Это связано, в частности, с существованием в кластерах Au локализованных плазмонов, имеющих большую добротность. Однако для создания структур Au/GaAs методом отжига принципиальным препятствием является химическое взаимодействие между Au и GaAs. Оно начинается при температуре выше 250 °C и приводит к внедрению золота в объем кристалла в виде сплава Au-Ga вместо образования нанокластеров Au.

В нашей работе развита технология создания методом отжига структур Au/N/GaAs(001), в которых нанесенная пленка Au и поверхность GaAs разделены монослоем нитрида GaN. Этот слой, химически нейтральный к Au, препятствует контакту золота и полупроводника, в процессе роста кластеров. Это позволяет получать нанокластеры химически чистого золота на поверхности подложки простым прогревом структур Au/N/GaAs.

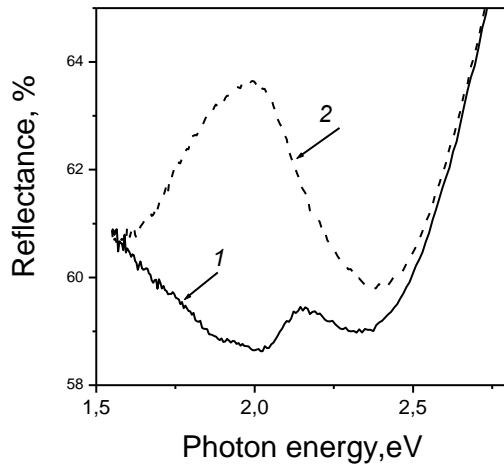
## Создание кластеров и диагностика

Исследуемые структуры создаются на подложках *n*-GaAs(001) с концентрацией примеси  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Поверхности подложек GaAs(001) подвергаются химической нитридизации в растворе гидразин-гидрата  $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  с малой добавкой сульфида

натрия  $\text{Na}_2\text{S}$  [1]. При этом на поверхности подложки формируется монослой нитрида, в котором атомы азота образуют связи с атомами Ga кристалла. На нитридизованную поверхность методом вакуумного испарения наносится пленка Au толщиной 10 нанометров. Приготовленные структуры Au/N/GaAs отжигаются в вакууме при температуре 300 °C. Данные атомно-силовой микроскопии показывают, что в результате отжига продолжительностью 240 мин. на поверхности структуры образуется массив нанокластеров Au. В нем доминируют кластеры, имеющие вид цепочек, ориентированных преимущественно вдоль направления  $[1\bar{1}0]$  на поверхности GaAs(001). Цепочки состоят из двух — четырех элементарных кластеров и имеют длины 50 — 100 нм и поперечные (в направлении  $[110]$ ) размеры 20 — 25 нм, характерные для элементарных кластеров. На основании этой картины можно предположить, что причиной образования таких кластеров является анизотропия диффузии атомов Au по нитридизованной поверхности N/GaAs(001), имеющей анизотропную кристаллическую структуру [2].

## Спектроскопия плазмонов и интерпретация результатов

Установленные анизотропия формы кластеров Au и их преимущественная ориентация предполагают, что локализованные на них плазмоны должны быть анизотропными относительно направлений  $[1\bar{1}0]$  и  $[110]$  на поверхности GaAs(001).

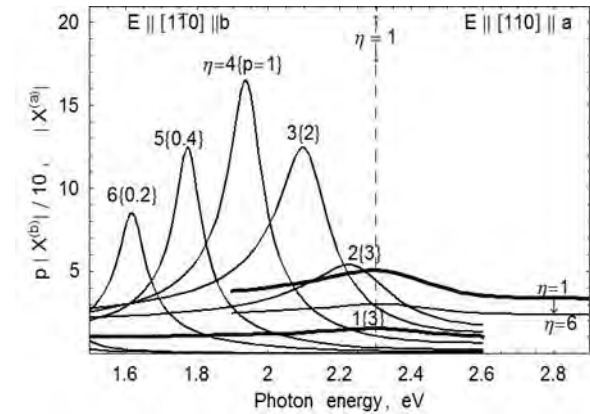


**Рис. 1** Спектры нормального отражения поляризованного света от структур Au/N/GaAs(001) после их отжига. Спектры 1 и 2 измерены для поляризации света  $E \parallel [110]$  и  $E \parallel [1\bar{1}0]$  соответственно

Для исследования анизотропии плазмонов использовалась спектроскопия нормального отражения света, поляризованного в направлениях  $E \parallel [110]$  и  $E \parallel [1\bar{1}0]$  в плоскости поверхности GaAs(001). Полученные спектры представлены на рисунке 1. Спектр отражения 1 с поляризацией вдоль направления  $[110]$ , содержит узкую особенность при энергии 2.1 эВ. В спектре 2 для поляризации света вдоль направления  $[1\bar{1}0]$  наблюдается существенно более интенсивная и широкая особенность с центром вблизи 1.8 эВ.

Особенности в спектрах поляризованного отражения, обнаруженные после отжига структур Au/N/GaAs(001), интерпретируются в оптической модели плазмонов, локализованных в нанокластерах Au [2]. Для нее вычисляются спектры компонент  $X^{(a)}$  и  $X^{(b)}$  безразмерной поляризуемости плазмонов, поляризованных в сфероиде вдоль полуосей  $a$  и  $b$ , отношение  $\eta = b/a$  длин которых определяет форму сфероида. Компоненты  $X^{(a)}$  и  $X^{(b)}$  ответственны за появление резонансных особенностей в спектрах 1 и 2 (рис.1) с поляризациями в направлениях  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$  соответственно. На рис. 2 представлены спектры компонент  $X^{(a)}$  и  $pX^{(b)}/10$  плазменной поляризуемости при разных значениях  $\eta = b/a > 0$  для сфероидов, вытянутых вдоль оси  $b$ . Спектры  $X^{(a)}$  и  $pX^{(b)}/10$  имеют вид элементарных линий в спектре плазмонов разной поляризации в сфероидах с разными  $\eta$ . Особенности в спектрах 1 и 2 имеют существенно большую ширину, чем плазменные линии  $X^{(a)}$  и  $pX^{(b)}/10$ , представленные на рис. 2. Следовательно, эти спек-

тральные особенности неоднородно уширены, т.е. состоят из узких линий, принадлежащих



**Рис. 2.** Спектры безразмерных поляризуемостей ( $E \parallel [110] \parallel a$ ) и  $p|X^{(b)}|/10$  ( $E \parallel [1\bar{1}0] \parallel b$ ), вычисленные для модели вытянутых Au сфероидов с отношениями длин полуосей  $\eta = b/a > 1$ , которые показаны целыми числами. Множители  $p$  учитывают статистический вклад контуров  $p|X^{(b)}|/10$  в особенность в спектре 2

эллипсоидам с разными, которые однозначно связаны с частотами плазмонов. Для иллюстрации этого элементарные линии  $pX^{(b)}/10$  на рис. 2 классифицируются параметрами  $\eta\{p\}$ , где  $p$  гипотетически выражает статистический вклад сфероидов с данным  $\eta$  (с соответствующей частотой плазмонов) в спектральную особенность. Видно, что положение и ширина огибающей спектральных вкладов  $pX^{(b)}/10$  качественно согласуется с характеристиками особенности, наблюдающейся в спектре 2 (рис. 1).

Итак, мы показали, что на поверхности GaAs(001) с покрывающим нитридным атомным слоем образуются сильно анизотропные массивы кластеров золота, форма и ориентация которых определяется кристаллографией поверхности кристалла.

Исследования выполнены при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект № 20-02-00257.

## Литература

1. V.L. Berkovits, V.A. Kosobukin, V.P. Ulin, et al. // Applied Surface Science V. 507, 144982 (2020).
2. V.L. Berkovits, V.A. Kosobukin, V.P. Ulin, et al. // Physica Status Solidi V. 259, 2100394 (2022).



# Применение лазерных методов имитации воздействия тяжелых заряженных частиц космического пространства при разработке интегральных схем

В.В. Бибикова<sup>\*1,2</sup>, И.Ю. Забавичев<sup>1,2</sup>, А.М. Захаров<sup>2</sup>, С.В. Карачкин<sup>2</sup>, М.Ю. Кошельчук<sup>2</sup>, И.Н. Полунин<sup>2</sup>, А.А. Потехин<sup>2</sup>, А.С. Пузанов<sup>1,2</sup>, А.В. Сафонов<sup>2</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603022.

<sup>2</sup> Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ул. Тропинина, д. 47, Нижний Новгород, 603137.

\*veronbib@mail.ru

Проведены исследования сбоеустойчивости шеститранзисторной ячейки памяти с проектными нормами 0,24 мкм, изготавливаемой по технологии «кремний на изоляторе», при облучении лазерными импульсами различной длительности, имитирующими воздействие тяжелых заряженных частиц космического пространства. Теоретически и экспериментально показан переход от «мощностного» к «интегральному» критерию стойкости субмикронных структур к воздействию частиц. Обсуждается возможность одновременной «засветки» нескольких транзисторов ячейки памяти сфокусированным лазерным излучением и влияние на сбоеустойчивость микросхемы в целом.

## Введение

В последнее время во всем мире наблюдается процесс увеличения числа центров по исследованию изделий микро- и наноэлектроники с помощью лазерных источников ультракоротких импульсов. Одним из практических приложений лазерного излучения длительностью 10 – 30 пс является имитация воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства на параметры изделий микроэлектроники [1, 2]. Интерес к лазерным имитаторам обусловлен их возможностью направленного воздействия на отдельные участки микросхемы с целью выявления наиболее критичных элементов изделия. Это позволяет не только оценить параметры стойкости микросхемы к воздействию ТЗЧ, но и указать критические узлы изделия, снижающие его сбоеустойчивость в целом. При этом существенно возрастает технико-экономическая эффективность опытно-конструкторских работ по созданию электронной компонентной базы за счет возможности оперативного внесения изменений в конструкцию и технологию изготовления разрабатываемого изделия.

Традиционно основное внимание уделяется оценке эквивалентности величины выделенной энергии в пятне локально сфокусированного лазерного излучения и в треке тяжелой заряженной частицы, а также определению коэффициента пропорциональности между энергией лазерного импульса и линейными потерями энергии ТЗЧ. Однако с уменьшением топологических норм элементов до субмикронных масштабов может реализоваться ситуация,

когда лазерное излучение одновременно «засвечивает» сразу несколько транзисторов в ячейке памяти, что не наблюдается при воздействии ТЗЧ.

## Объект исследований

В качестве объекта теоретических и экспериментальных исследований была выбрана шеститранзисторная ячейка статической памяти с проектными нормами 0,24 мкм, изготавливаемая по технологии «кремний на изоляторе». Из рисунка 1 видно, что сфокусированное до диаметра 2,5 мкм (что близко к дифракционному пределу для длины волны излучения 1064 нм) лазерное излучение может одновременно воздействовать на три транзистора в ячейке. С дальнейшим уменьшением топологических норм возможна «засветка» всей ячейки.

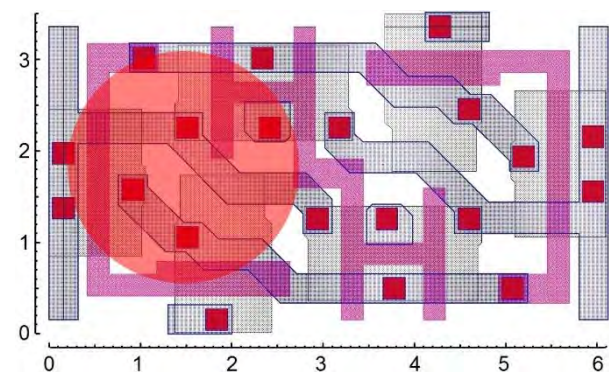
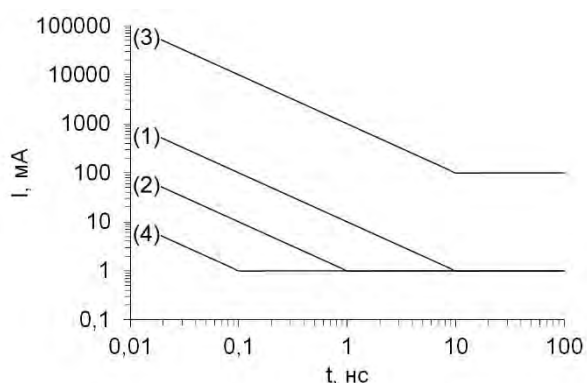


Рис. 1. Топология шеститранзисторной ячейки памяти размерами 6,1×3,5 мкм; ○ – возможная область «засветки»

## Результаты и обсуждение

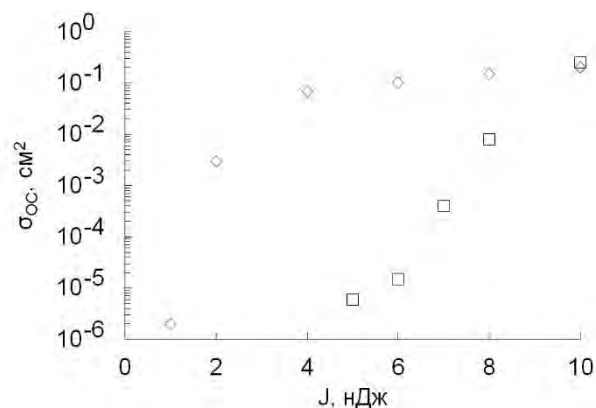
Установлено (рисунок 2), что при длительности возмущающего воздействия, меньшей некоторого значения, амплитуда ионизационного тока, требуемая для переключения ячейки памяти, обратно пропорциональна длительности этого воздействия. При более длительных воздействиях амплитуда ионизационного тока, при которой происходит переключение ячейки памяти, является величиной постоянной, не зависящей от длительности воздействия. Полученный результат ранее теоретически интерпретирован в работе [3].



**Рис. 2.** Параметры ионизационного тока, необходимого для переключения ячейки памяти. Воздействие: (1) – на всю ячейку; (2) – на три транзистора; (3) – на два транзистора; (4) – на один транзистор

Для проверки полученного результата был проведен облучательный эксперимент с использованием лазеров нано- и пикосекундной длительности с длиной волны 1064 нм, что исключало разогрев электронно-дырочного газа [4, 5]. Сравнение результатов, приведенных на рисунке 3, показывает, что эффективность наносекундного лазера ниже, чем пикосекундного по эффектам одиночных сбоев. Это может привести к занижению порога и сечения одиночных сбоев при оценке параметров стойкости субмикрон-

ных микросхем к воздействию ТЗЧ при использовании лазера с наносекундной длительностью импульса.



**Рис. 3.** Сечение одиночных событий при различных значениях энергии лазерного излучения при воздействии наносекундного (□) и пикосекундного (◇) лазера

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального центра физики и математики (НЦФМ).

## Литература

1. R. Jones, A.M. Chugg, C.M.S. Jones et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science, V. NS-47, No. 4, P. 539 (2000).
2. А.И. Чумаков, А.Н. Егоров, О.Б. Маврицкий и др. // Микроэлектроника, Т. 33, № 2, С. 128 (2004).
3. А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов // Физика и техника полупроводников. Т. 54, № 8. С. 791 (2020).
4. А.С. Пузанов, В.В. Бибикина, И.Ю. Забавичев и др. // Письма в журнал технической физики, Т. 47, № 6, С. 51 (2021).
5. Пузанов А.С., В.В. Бибикина, И.Ю. Забавичев и др. // Физика и техника полупроводников, Т. 55, № 9. С. 743 (2021).

# Особенности формирования планарных световодов для создания фотонных микросхем на кремниевой основе

А.И. Бобров<sup>1</sup>, Д.С. Клементьев<sup>2</sup>, Ю.И. Чигиринский<sup>1</sup>, Ю.А. Дудин<sup>1</sup>, А.В. Негин<sup>2</sup>, К.В. Сидоренко<sup>1</sup>, А.Н. Шушунов<sup>1</sup>, А.В. Ершов<sup>3</sup>, А.В. Нежданов<sup>3</sup>, Н.В. Малехонова<sup>1</sup>, А.В. Боряков<sup>2</sup>, М.П. Федонин<sup>2</sup>, В.В. Стоякин<sup>4</sup>, В.А. Харламов<sup>4</sup>

1 НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, корп.3, Нижний Новгород, 603950.

2 Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ул. Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603137.

3 Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, физический факультет, пр. Гагарина, 23, корп.3, Нижний Новгород, 603950.

4 ООО «Т8», ул. Краснобогатыйская, 44, ст. 1, Москва, 107076.

\*bobrov@phys.unn.ru

Представлен результат изготовления планарных фотонных микросхем на основе системы  $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$  методами магнетронного распыления и электронно-лучевого испарения. Проведён анализ применимости различных подходов к формированию оптических волноводных структур на кремниевой основе.

## Введение

Планарные фотонные микросхемы на основе слоёв смешанных оксидов кремния и германия подробно были исследованы в 80-90 годы XX века [1]. При этом в настоящее время эта система оказалась востребована для создания гибридных оптоэлектронных микрочипов, таких как DP QPSK-модуляторы лазерного излучения по схеме планарного интерферометра Маха-Цендера, применяемых в современных DWDM-системах [2].

Преимуществом планарных оптических волноводов  $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$  являются низкие потери при распространении в них лазерного излучения [3]. Кроме того, они имеют хорошее согласование числовых апертур со стандартным кварцевым оптоволоком и планарными оптическими волноводами, формируемыми в ниобате лития [4]. Благодаря этому достигаются минимальные оптические потери при их стыковке.

На сегодняшний день для решения задачи изготовления оптических микросхем применяются три метода: магнетронное распыление, электронно-лучевое испарение и плазмохимическое осаждение. Последнее является наиболее эффективным из перечисленных подходов, что обусловлено простотой управления составом слоёв, высокой скоростью их осаждения, однородностью по толщине получаемых плёнок. Однако применение соединений германия приводит к загрязнению реактора установки плазмохимического осаждения, что налагает ограничения на применимость метода в рамках стандартной кремниевой технологии.

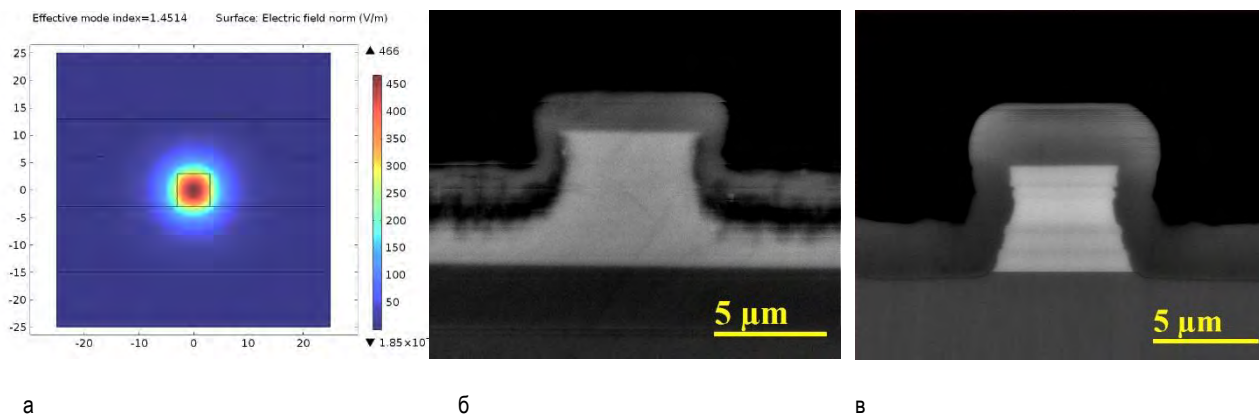
Таким образом, для создания слоёв  $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$  на практике могут быть использованы два метода – магнетронное распыление и электронно-лучевое испарение. В работе приведён анализ опыта их применения.

## Методика эксперимента

Математическое моделирование с целью определения геометрии и профиля показателя преломления планарного оптического волновода было осуществлено посредством программной среды COMSOL Multiphysics® (рис.1а).

Формирование слоёв смешанных оксидов кремния и германия производилось магнетронным распылением на установке «УВН-2М» и электронно-лучевым испарением на установке «Оратория 9». Формирование оболочки планарного оптического волновода из оксида кремния было выполнено методом плазмохимического осаждения. Работы осуществлены на материально технической базе Филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова».

Измерения толщин и показателей преломления плёнок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$  производились с помощью спектроскопического эллипсометра PhE-102. Структура оптических волноводов контролировалась на поперечном срезе посредством растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6495. Оптические потери в планарных волноводах измерялись на установке автоматической стыковки IFA600 (FIBERPRO, Корея).

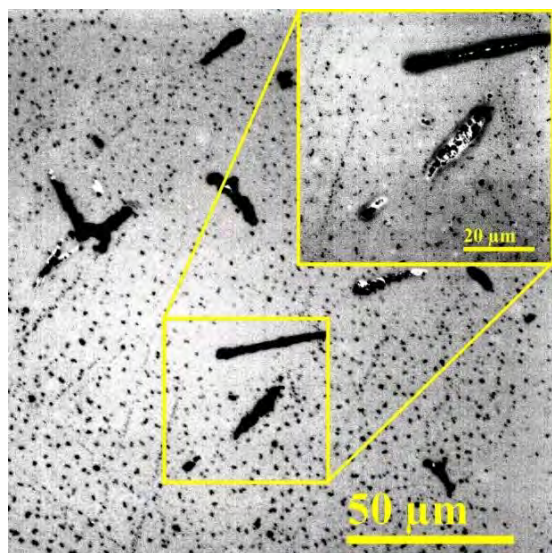


**Рис. 1.** (а) Математическая модель  $\text{GeO}_2\text{:SiO}_2$  оптического волновода, (б) снимок поперечного сечения волновода, полученного методом магнетронного распыления, (в) снимок поперечного сечения волновода, полученного методом электронно-лучевого испарения

## Результаты

Магнетронное распыление обеспечило получение однородных по структуре и составу слоёв  $\text{GeO}_2\text{:SiO}_2$  (рис. 1б). При этом метод отличается низкой скоростью осаждения диэлектрических плёнок – на уровне 0,8 мкм/ч.

Электронно-лучевое испарение позволяет формировать слои смешанных оксидов со скоростью в 10 раз большей (рис. 1в). При этом полученные плёнки продемонстрировали дефекты, возникающие из-за попадания на пластину капиллярной фракции из испаряемой мишени (рис. 2).



**Рис. 2.** Снимок дефектов в плёнке смешанных оксидов, полученной методом электронно-лучевого испарения

Установлено, что снижение ускоряющего напряжения и тока на электронной пушке позволяет уменьшить число дефектов, однако при этом существенно падает скорость осаждения оксидного слоя.

Таким образом, применение и магнетронного распыления, и электронно-лучевого испарения для создания планарных оптических микросхем является малоэффективным, особенно в контексте организации крупносерийного производства.

По результатам проведённых работ было принято решение перейти в дальнейшем к применению оксинитридов кремния в качестве материала сердцевины планарного оптического волновода.

Соответствующий выбор обусловлен тем, что указанный материал может быть получен методом плазмохимического осаждения в рамках стандартного кремниевого технологического процесса.

Кроме того, он обеспечивает вариативность состава и связанного с ним показателя преломления в диапазоне, необходимом для создания планарных оптических микросхем и идентичном системе  $\text{GeO}_2\text{:SiO}_2$ . Соответствующие оценки подтверждаются результатами, опубликованными в работе [3].

## Литература

1. Agnes S. Huang *et al.* // Applied Optics, V. 24, 4404 (1985). DOI: 10.1364/ao.24.004404.
2. Shinji Mino *et al.* // NTT Technical Review, V. 9, 1 (2011). DOI: 10.1364/OFC.2011.OWV1
3. Christopher R. Doerr // Frontiers in Physics, V.3, 1 (2015). DOI: 10.3389/fphy.2015.00037
4. Aratake A. *et al.* // IEICE Trans. Electron, V. 103, 353 (2020). DOI: 10.1587/transle.2019ECP5044.
5. Luboš Podlucky *et al.* // Coatings, V. 11, 574 (2021). DOI: 10.3390/coatings11050574.

# Новые методы визуализации ТГц изображений

С.Б. Бодров<sup>1,2</sup>, А.А. Мурзанев<sup>1</sup>, А.И. Корытин<sup>1</sup>, Ю.А. Сергеев<sup>1</sup>, А.Н. Степанов<sup>1,\*</sup>,  
О.В. Чефонов<sup>3</sup>, А.В. Овчинников<sup>3</sup>, М.Б. Агранат<sup>3</sup>

1 Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950.

2 Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

3 Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва, 125412.

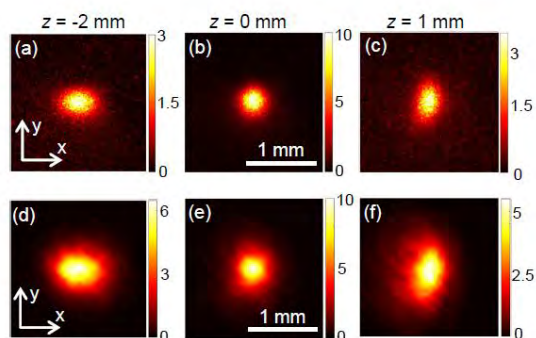
\*step@ufr.appl.sci-nnov.ru

Экспериментально продемонстрированы два метода визуализации интенсивных ТГц полей, основанные на регистрации пространственного распределения с помощью CCD камер. Механизмом визуализации в первом методе является ионизация кремния CCD матрицы сильным ТГц полем. Во втором для построения ТГц изображений используется люминесценция графена в ТГц полях порядка сотни киловольт на сантиметр

За последние несколько десятилетий терагерцовая область превратилась в достаточно зрелое направление физических исследований. Были созданы источники излучения в терагерцовом диапазоне частот, работающие на разнообразных физических принципах. Появились детекторы терагерцового излучения, позволяющие измерять энергию ТГц импульсов, спектральный состав излучения, временную форму. Отдельно стоит проблема визуализации пространственного распределения терагерцового излучения. Исторически первой методикой, реализованной для ТГц изображений была терагерцовая спектроскопия во времени (THz Time Domain Spectroscopy). В дальнейшем для формирования изображений ТГц в режиме реального времени были разработаны ТГц датчики на основе теплового возбуждения (различные типы охлаждаемых и не охлаждаемых болометров, пироэлектрических детекторов, ячейки Голея) и другие. Несмотря на прогресс, достигнутый в получении изображения распределения ТГц полей, развитие чувствительного, быстрого, работающего при комнатной температуре ТГц детекторов остается актуальной задачей.

В настоящей работе приводятся результаты исследований, в которых предлагаются и экспериментально исследуются два новых метода визуализации интенсивных ТГц полей, основанные на регистрации пространственного распределения с помощью CCD камер. В первом методе показано, что при измерении полей порядка МВ/см может быть использована обычная коммерческая CCD матрица. Появление сигнала на матрице в этом случае происходит за счет генерации носителей в процессе ионизации кремния. Во втором методе облучение графена ТГц излучением

с полями порядка сотни киловольт на сантиметр приводит к появлению оптической эмиссии, регистрируемой CCD матрицей. Результаты измерений распределения терагерцовых полей (плотности потока энергии) по оптической эмиссии графена и сравнение с измерениями электрооптическим методом приведены на рисунке ниже.



**Рис. 1.** Изображения распределения плотности потока ТГц излучения в разных сечениях пучка  $z$ , измеренные по оптической люминесценции графена (верхний ряд) и по электрооптическим измерениям (нижний ряд). (а),(d)  $z = -2$  мм, (b),(e)  $z = 0$  мм, (c),(f),  $z = 1$  мм,  $z = 0$  мм соответствует фокусу

Работа выполнена при поддержке НЦМУ и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № 0030-2021-0012.

## Литература

1. O.V. Chefonov, A.V. Ovchinnikov, M.B. Agranat, and A.N. Stepanov. *Optics Letters*, **44** (17), 4099 (2019).
2. S. Bodrov, A. Murzanov, A. Korytin, and A. Stepanov. *Optics Letters*, **46**(23), 5946-5949. (2021).



# Методика многопараметрического анализа влияния эффекта всплеска скорости в канале короткоканальных транзисторов

А.Д. Боженькина<sup>1,\*</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,2</sup>, И.В. Макарецв<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> ОАО "НПП Салют", Нижний Новгород, 603950.

\*nnastasiaa@rambler.ru

Исследовано влияние формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных структур. Проведены оценки изменения проводимости канала современных кремниевых транзисторов с различными размерами рабочих областей.

## Введение

На основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs были созданы высокочастотные усилители большой мощности, способные работать в миллиметровом диапазоне [1]. Тем не менее проблема создания усилителя с выходной мощностью > 110 мВт в диапазоне частот 90–110 ГГц до сих пор остается актуальной [2]. Цель данной работы – усовершенствование комплекса аналитической и одномерной численной модели НЕМТ транзисторов. Разработка методики многопараметрического анализа влияния эффекта всплеска скорости в канале короткоканальных транзисторов.

Ранее авторами [3–5] детально изучались особенности физико-топологического моделирования данных структур, был предложен комплекс аналитических и численных моделей для расчета электрофизических параметров исследуемых приборов. Важной особенностью предлагаемого комплекса моделей является численный расчет параметров переноса электронов вдоль канала транзистора их скорости и энергии. За счет использования одномерной модели становится возможным проведение многопараметрической (до 5–7 параметров и более) оптимизации параметров транзистора. Последнее важно при использовании многослойных гетероструктур, каждый из слоев которых характеризуется рядом параметров – толщиной, проводимостью и т.п.

## Исследуемые структуры

В расчётах были использованы транзисторы приборные НЕМТ гетероструктуры ES-228 и ES-344 с двухсторонним легированием канала (double НЕМТ). Особенности конструкции приборных double НЕМТ гетероструктур является наличие дополнительного поставщика электронов в канал –

высоколегированного слоя  $n^+$ -AlGaAs, расположенного ниже канального слоя InGaAs, обеспечивающего поставку дополнительного количества электронов в проводящий канал [6], контактного слоя  $n^+$ -GaAs [6]. Концентрация и подвижность 2D газа в канале составляет  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $7000 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ . Дизайн структуры показан в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры слоев транзисторной гетероструктуры

Наименование слоя эпитаксиальной структуры	Материал	Толщина слоя, нм
Контактный	In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	20
Etch-stop	InAlAs	3
Контактный	In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	15
Барьерный	In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	21
Композитный канал		26
Буферный	In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	150
Подложка InP (100)		

## Параметры структур

Гетероструктура InAlAs/InGaAs (RC-1725) с двухсторонним легированием канала на подложке InP была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург [7]. Для используемой структуры типичные значения концентрации и подвижности 2D газа в канале составляют  $(2.8–3.1) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $9500–10\,000 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$  соответственно. Дизайн структуры показан в табл. 2 [7].

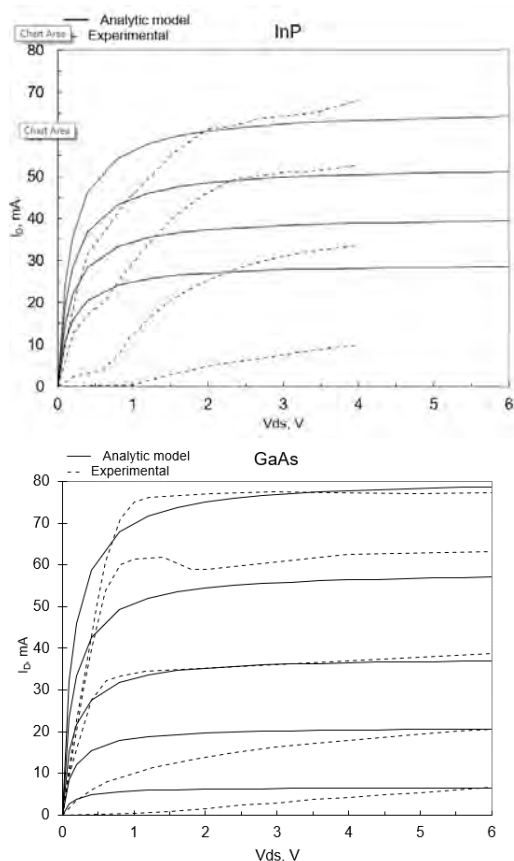
В АО НПП «Салют» были изготовлены три партии СВЧ полевых транзисторов с затвором длиной 100 нм и шириной 120 мкм: на структуре ES-228 травление проходило однократно, затвор расположен по центру между стоком и истоком (SR-HEMT GaAs), на структурах ES-344 и RC-1725 проводилось двойное травление, затвор смещен к истоку транзистора (DR-HEMT GaAs и DR-HEMT InP со-

ответственно). Для других подложек форма затвора и длина были аналогичными.

**Таблица 2.** Параметры слоев транзисторной гетероструктуры НЕМТ InP

Наименование слоя эпитаксиальной структуры	Материал	Толщина слоя, нм
Контактный слой	$n^+$ -GaAs	50–60
Etch-stop слой	AlAs	2–3
Барьерный слой 1	GaAs	15–20
Барьерный слой 2	$Al_xGa_{1-x}As$	5–7
Легированный слой	$n^+$ - $Al_xGa_{1-x}As$	15–20
Спейсер	$Al_xGa_{1-x}As$	2–3
Сглаживающий слой	GaAs	1–3
Канальный слой	$In_xGa_{1-x}As$	8–15
Сглаживающий слой	GaAs	1–3
Спейсер	$Al_xGa_{1-x}As$	2–3
Легированный слой	$n^+$ - $Al_xGa_{1-x}As$	2–6
Буферный слой 1	$Al_xGa_{1-x}As$	100–150
Буферный слой 2	GaAs	200–300
Подложка	$i$ -GaAs	

## Результаты расчетов и их обсуждение



**Рис 1.** Сравнение вольтамперных теоретических (сплошная линия) и экспериментальных (штрих линия) характеристик. От -1,2 В до 0,4 В с шагом 0,4 В для GaAs структуры и от -0,8 В до -0,2 В с шагом 0,2 В для InP структуры

Результаты измерений статических характеристик исследуемых транзисторов показаны на рис. 1. Наличие области отрицательного дифференциального сопротивления связано с междолинным рассеянием электронов в транзисторах с узким затвором. Двойная канавка увеличивает ток стока транзисто-

ра, что связано с увеличением скорости электронов в канале. Аналитически рассчитанные значения удельной крутизны составили 374,5 мСм/мм для структуры GaAs и 888 мСм/мм для InP.

Транзисторы, выполненные по технологии двойного травления на структуре InP НЕМТ, показали в 2 раза большую крутизну ( $\sim 1000$  мСм/мм), чем транзисторы на структуре ES-344 GaAs НЕМТ, вследствие большей подвижности электронов в канале и меньшего напряжения отсечки (см. рис. 2). Стоит отметить, что несмотря на большое пробивное напряжение затвор-исток (12 В), транзисторы на структуре InP имели рабочее напряжение на стоке не более 4В.

## Заключение

Рассчитанные значения параметров при помощи исследуемой модели довольно близки к опытным. Для GaAs структуры отклонение составило 6%, и 11% для InP.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057.

## Литература

1. S.-J. Cho, C. Wang, R.K. Maharjan, N.-Y. Kim. Proceedings of APMC 2012 (Kaohsiung, Taiwan, 2012) p. 4.
2. В.А. Беляков, И.В. Макарец, А.Г. Фелелов, С.В. Оболенский, А.П. Васильев 3, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, Н.А. Малеев // Влияние технологии двойного травления под затвор на параметры НЕМТ транзисторов на подложках GaAs и InP
3. Е. А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский и др. // Физика и техника полупроводников, т. 46, вып. 12, с 1587–1592, 2012 г.
4. Yokoyama K., Hess K. Monte Carlo study of electronic transport in  $Al_{1-x}Ga_xAs/GaAs$  single-well heterostructures // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 33, N 8. P.5595-5605.
5. Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, С.В. Хазанова, Н.Н. Григорьева, О.Л. Голиков, А.Б. Иванов, А.С. Пузанов, А.Д.Боженкина. // Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, вып. 9, с 968 – 973, 2020.
6. J.V. Boos, W. Kruppa. Electron. Lett., 27, 1909 (1991).
7. Н.А. Малеев, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, М.А. Бобров, М.М. Кулагина, С.И. Трошков, С.Н. Малеев, В.А. Беляков, Е.В. Петряков, Ю.П. Кудряшов, Е.Л. Фелелова, И.В. Макарец, С.А. Блохин, Ф.А. Ахмедов, А.В. Егоров, А.В. Егоров, А.Г. Фелелов, В.М. Устинов. Письма ЖТФ, 45 (21), 29 (2019).

# Однофотонное возбуждение биэкситонов в объемном кремнии и в кремниевых нанокристаллах

В.А. Бурдов\*, С.А. Фомичёв

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, проспект Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

\*burdov@phys.unn.ru

Обсуждается возможность рождения двух электронно-дырочных пар за счет поглощения одного фотона в объемном кремнии и в кремниевом кристаллите сферической формы. В рамках стандартного подхода, базирующегося на использовании Золотого правила квантовой механики, рассчитаны вероятности этого процесса и показано, что он реализуется исключительно за счет кулоновского взаимодействия между электронами.

## Введение

Хорошо известно, что межзонное поглощение или излучение в кремнии (а также и в наноструктурах на его основе) является сильно подавленным в силу непрямозонности данного материала, которая приводит, фактически, к невозможности выполнения закона сохранения импульса при таком электронном переходе. Вместе с тем, если энергию фотона увеличить вдвое, то будет возможно перевести два электрона из окрестности максимума энергии в валентной зоне в окрестность двух минимумов энергии в зоне проводимости, расположенных симметрично относительно центра зоны Бриллюэна, не нарушая законов сохранения. Единственным требованием, предъявляемым к системе, без выполнения которого процесс становится невозможным, является наличие взаимодействия между электронами [1]. Нами был выполнен расчет скорости (обратного времени) процесса двухэлектронного возбуждения за счет поглощения одного фотона как в объемном кремнии, так и в кремниевом нанокристалле сферической формы.

## Метод расчета

Для расчета скорости рождения биэкситона будем использовать стандартную процедуру, основанную на Золотом правиле Ферми:

$$\tau^{-1} = \frac{2\pi}{\hbar} \left( \frac{eA}{mc} \right)^2 |\mathbf{e}_\alpha \mathbf{p}_f|^2 \delta(\hbar\omega - \varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (1)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса свободного электрона,  $c$  – скорость света,  $A$  – амплитуда векторного потенциала электромагнитной волны поляризации  $\alpha$  и частоты  $\omega$ ,  $\mathbf{e}_\alpha$  – единичный вектор поляризации,  $\mathbf{p}_f$  – матричный элемент оператора импульса, вычислен-

ный относительно конечного и начального состояний многоэлектронной системы. При этом мы рассматриваем ситуацию, когда рожденные электронно-дырочные пары имеют энергии  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , либо равные ширине оптической щели нанокристалла (если рассматривается нанокристалл), либо близкие к ширине запрещенной зоны  $\varepsilon_g$  кремния (если рассматривается объемный материал). Одноэлектронные состояния, из которых впоследствии конструируются многоэлектронные состояния системы с кулоновским взаимодействием, рассчитываются в рамках приближения огибающей.

## Результаты

В случае объемного кремния была получена зависимость скорости процесса от частоты фотона вблизи порога поглощения, имеющая вид  $\tau^{-1} \sim (\hbar\omega - 2\varepsilon_g)^{7/2}$ , и свидетельствующая об относительной слабости данного процесса в объемном кремнии. В другом случае – в кремниевом нанокристалле – была получена зависимость скорости перехода от размера нанокристалла. Как показали проведенные расчеты, с уменьшением размера нанокристалла скорость рождения биэкситона начинает возрастать, что обусловлено постепенным ослаблением непрямозонности (в силу нарастающего перекрытия волновых функций электронных состояний) и усилением кулоновского взаимодействия в системе, обеспечивающего принципиальную возможность возбуждения биэкситона одним фотоном.

## Литература

1. L. Garziano, V. Macri, R. Stassi, *et al.* // Physical Review Letters 117, 043601 (2016).

# Фазоизменяемые материалы и нейроморфные оптические устройства на их основе

**А.А. Бурцев, А.В. Киселев, В.В. Ионин, Н.Н. Елисеев, В.А. Михалевский, А.А. Лотин**

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, 1, г. Шатура, Московская область, 140700.

\* murrkiss2009@yandex.ru

В работе представлены исследования переключения тонкой пленки фазоизменяемого материала GST<sub>225</sub> импульсным лазерным излучением наносекундной длительности, реализация и экспериментальное исследование прототипа оптического синапса на основе полимерного волновода с нанесенным оптически управляемым элементом в виде тонкой пленки фазоизменяемого материала. Продемонстрирована возможность управления проходящим через волновод оптическим сигналом внешним лазерным воздействием на активный элемент.

## Введение

Стремительное развитие крупных центров обработки информации, рынка хранения данных и всемирных компьютерных сетей формирует высокий спрос на принципиально новые подходы реализации и использования устройств передачи и хранения данных, а также предъявляет повышенные требования к скоростям обработки информации и к способам ее размещения. Новые технологии важны для повышения вычислительной производительности, позволяя миновать узкое место архитектуры фон Неймана, то есть ограничение вследствие необходимости передачи информации между процессором и модулями памяти [1]. По сравнению с другими вычислительными методологиями, такими как квантовые вычисления, логическая память и стохастические вычисления, нейроморфные вычисления, основанные на принципах работы головного мозга, обеспечивают прорывное решение для выполнения надежных функций обучения и сложных вычислений с более высокой энергоэффективностью и отказоустойчивостью, используя массивный параллелизм в нейронных сетях [2].

Технологии на основе фазоизменяемых материалов (ФИМ), в частности GST<sub>225</sub>, наиболее зрелые для реализации полностью оптических устройств хранения и обработки информации. Они уже были предметом интенсивных исследований и разработок в течение последнего десятилетия, но в контексте электронных модулей памяти и оптических дисков высокой плотности записи [3]. Яркой и функциональной особенностью этих материалов является высокий контраст между кристаллической и аморфной

фазами как по их электрическим, так и по оптическим свойствам. В частности, ФИМ на основе халькогенидов обладают способностью переключаться между этими двумя состояниями в ответ на соответствующие тепловые воздействия (кристаллизация) или процессы стеклования расплава (аморфизация). Ячейка на основе тонких пленок халькогенидов может хранить несколько состояний, которые соответствуют разному соотношению аморфной и кристаллической фаз. Ячейки многоуровневых состояний обладают рядом принципиальных свойств, таких как предпороговый режим накопления энергии, пороговое значение энергии перехода и нелинейное поведение при переключении состояний, что позволяет рассматривать их работу как аналог биологического нейрона [4].

## Исследование и разработка

В известных схемах оптического синапса ФИМ наносится поверх оптического волновода из нитрида кремния [5]. Вместо обнаружения сигналов отражения, как на оптическом диске, информация записывается непосредственно через величину оптического пропускания по волноводам, управляемую нераспространяющимися импульсами [6]. С помощью мощного лазерного импульса в масштабе времени нано- или субнано-секунд GST<sub>225</sub> переключается между кристаллической и аморфной фазами [7]. Несмотря на достигнутые успехи в экспериментальной реализации прототипов устройств оптических синапсов, создание синапсов на основе твердотельных оптических волноводов несет в себе определенные технологические трудности, что обуславливает сложность и дороговизну при производственном

внедрении. Интегрированная фотоника на основе полимеров предлагает ряд преимуществ по сравнению с кремнием в ряде применений [8].

Световедущие жилы изготавливались из фоторезиста SU-8 2005 ( $n=1.55$ ) на подложке из термически окисленного кремния, с толщиной окисла ( $\text{SiO}_2$ ) 3 мкм. Данный полимер эффективно зарекомендовал себя в с-спектральном диапазоне ( $\lambda=1550$  нм) [9]. Затем на поверхности волновода с помощью масок были нанесены круглые области тонкой (50 нм) пленки  $\text{GST}_{225}$  методом термического вакуумного напыления.

При однократном импульсном воздействии ( $\lambda=532$  нм,  $\tau=15$  нс,  $E=33$  мДж/см<sup>2</sup>), продемонстрировано изменение уровня проходящего сигнала ( $\lambda=1550$  нм) с последующим восстановлением прежнего уровня пропускания [10]. В аморфном состоянии пленки излучение распространяется по образованному волноводу из элемента  $\text{GST}_{225}$ . А в кристаллическом состоянии происходит поглощение волны. Предложенная концепция создания оптических синапсов является самой дешевой из всех известных планарных технологий создания волноводных оптических синапсов и позволяет реализовать вычислительные элементы и архитектуры на их основе с высокой степенью гетерогенной интеграции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-12024 и Министерства науки и высшего образования РФ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

## Литература

1. D.V. Christensen, R. Dittmann, B. Linares-Baranco et al. // *Neuromorphic Computing and Engineering*, Accepted Manuscript (2022).
2. W. Zhang, R. Mazzarello, M. Wuttig et al. // *Nat. Rev. Mater.*, V. 4, 150–168 (2019).
3. E.R. Meinders, A.V. Mijiritskii, L. van Pieterse et al. *Optical Data Storage. Phase-Change Media and Recording*. Springer Science+Business Media, 2006.
4. S.R. Ovshinsky. // *Jpn. J. Appl. Phys.*, V.43, 4695 (2004).
5. S-T. Han, Y. Zhou. *Photo-Electroactive Non-Volatile Memories for Data Storage and Neuromorphic Computing*. Woodhead Publishing, 2020.
6. F. Brücknerhoff-Plückelmann, J. Feldmann, C.D. Wright et al. // *J. Appl. Phys.*, V. 129, № 15, 151103 (2021).
7. A.V. Kiselev, V.V. Ionin, A.A. Burtsev et al. // *Optics & Laser Technology*, V. 147, 107701 (2022).
8. J.C. Ramirez, J.N. Schianti, M.G. Almeida et al. // *Optical Materials Express*, V.7, 2651 (2017).
9. V. I. Sokolov, G. V. Mishakov, V. Y. Panchenko et al. // *Opt. Mem. Neural Networks*, V.16, № 2, 67–74 (2007).
10. V.V. Ionin, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev et al. // *Appl. Phys. Lett.*, V.119, 081105 (2021).



# Двумерные плазменные возбуждения в неупорядоченном массиве квантовых антиточек

Ю.Б. Васильев

<sup>1</sup>Физико-технический институт РАН, ул. Политехническая 26, Санкт-Петербург, 194021.

yu.vasilyev@mail.ioffe.ru

Экспериментально изучаются плазменные возбуждения в двумерных электронных системах в гетеропереходе AlGaAs/GaAs, содержащем слой самоорганизующихся антиточек на гетерогранице. В магнитном поле в спектрах терагерцового поглощения, полученных методами фурье-спектроскопии, наряду с циклотронным резонансом наблюдается магнитоплазменная мода. С ростом магнитного поля происходит экстремальное уменьшение ширины магнитоплазменной линии, что можно объяснить локализацией плазмонов магнитным полем в неупорядоченной решетке антиточек.

## Введение

Плазменные волны не взаимодействуют со светом, в свободном пространстве из-за большого рассогласования их импульсов. Существуют различные подходы для согласования импульсов, основанные на дифракции света, например, формируются низкоразмерные структуры (полоски и диски), используется рассеяние света на дифракционных решетках, на различного рода неоднородностях. В качестве альтернативы, эффективная связь света с плазменными колебаниями для возбуждения плазмонов может быть достигнута в периодически модулированных структурах, таких как массив антиточек. В данном докладе изучается возбуждение двумерных плазменных возбуждений в неупорядоченном массиве квантовых антиточек. Из-за отсутствия периодичности в такой решетке возбуждаются широкие плазменные моды. Приложение магнитного поля приводит к формированию очень узкой магнитоплазменной моды, что можно объяснить локализацией плазмонов магнитным полем.

## Образцы

Образцы, используемые в эксперименте, состоят из инвертированного одиночного гетероперехода AlGaAs/GaAs с массивом самоорганизованных квантовых островков AlInAs, сформированных в плоскости перехода на поверхности AlGaAs. Данные STM и AFM показывают, что островки имеют форму окружности с диаметром от 6 до 12 нм и «высотой» в направлении роста  $\sim 1$  нм. Их концентрация порядка  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>, т.о. среднее расстояние между ними  $\sim 10$  нм. Из-за более высокой энергии минимума зоны проводимости и ширины запре-

щенной зоны AlInAs по сравнению с GaAs, островки AlInAs представляют собой области свободные от электронов, и поэтому обладают характеристиками антиточек, обеспечивая короткодействующий отталкивающий потенциал для электронов в GaAs. Образцы снабжены верхним металлическим затвором для изменения концентрации электронов.

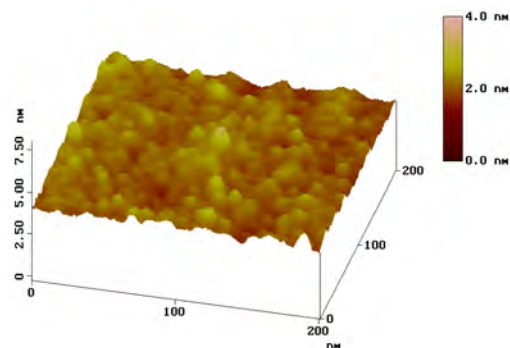


Рис. 1. Изображение морфологии поверхности гетероперехода

## Эксперимент

Двумерные плазменные возбуждения в двумерном электронном газе (2DEG) гетероперехода изучались методом терагерцового поглощения при температуре  $T=2$  К с использованием Фурье спектрометра в магнитных полях до 12Т, приложенных перпендикулярно к образцу. Все спектры были нормализованы к спектру в отсутствии магнитного поля, чтобы исключить влияние подложки на измерения. Концентрация носителей 2DEG при различных смещениях затвора ( $V_g$ ) оценивалась из осцилляций Шубникова – де Гааза.

## Результаты

Типичный вид линий терагерцового поглощения показан на рис. 2 для образца с плотностью носителей  $n_s=0.52 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . Спектры поглощения были получены при фиксированных магнитных полях. Видно, что ширина линии меняется с изменением магнитного поля и становится очень узкой при больших магнитных полях. Измеренные спектры были проанализированы путем оценки полной ширины на половине максимума (FWHM), которая отложена как функция магнитного поля на вставке к рис. 2. Хорошо видно, что ширина линии поглощения значительно уменьшается с ростом магнитного поля. Величина FWHM равна  $1 \text{ cm}^{-1}$  при магнитных полях около 4 Тл и далее плавно уменьшается до  $0,4 \text{ cm}^{-1}$  для более сильных полей. Столь малая ширина линии является неожиданной для такой неупорядоченной системы. В слабых магнитных полях транспортная подвижность, определенная по измерениям Шубникова-де Гааза  $\mu_T=9.3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  для образца с  $n_s=0.52 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  согласуется с ожидаемой низкой транспортной подвижностью из-за рассеяния на антиточках InAlAs. Очень узкая линия CR предполагает, что рассеяние электронов резко уменьшается при увеличении магнитного поля.

Классическое баллистическое движение 2D-электронов, взаимодействующих с неупорядоченной решеткой антиточек в магнитном поле было рассчитано в работе [1]. Помимо обычного перколяционного фазового перехода, связанного с геометрическими размерами, был найден порог магнитной перколяции, разделяющий неограниченное движение для большого циклотронного радиуса R и полную локализацию электронов при малых R. Это связано с существованием локализованных траекторий в 2D-системе. Первый тип траекторий - это круговые траектории, на которых отсутствуют любые столкновения. Другой вид - розеткообразные траектории, возникающие в результате возврата свободной траектории в магнитном поле к точке ее старта на антиточке. В достаточно слабом магнитном поле большинство траекторий пересекается

с множеством антиточек, поэтому локализованные траектории встречаются редко. Средняя вероятность того, что электрон не столкнется с антиточками, определяется циклотронным радиусом электронов R на поверхности Ферми. Эта доля локализованных траекторий растет с ростом магнитного поля. Среди траекторий рассеяния есть как локализованные, так и делокализованные. Если магнитное поле достаточно велико, делокализованные траектории исчезают, потому что циклотронный диаметр становится меньше расстояния между поверхностями антиточек. Это магнитный перколяционный фазовый переход. Подобные рассуждения, по-видимому, применимы для плазмонов. Формирование локализованных плазмонов сопровождается уменьшением ширины линии поглощения. Более того экстремально узкая спектральная ширина плазменной моды указывает на коллективный эффект. Когда дифрагированная волна, возникшая при рассеянии света на антиточках, распространяется в плоскости массива, она может соединить вместе локализованные плазмонные резонансы, связанные с отдельными антиточками, что приведет к резкому сужению плазмонных резонансов.

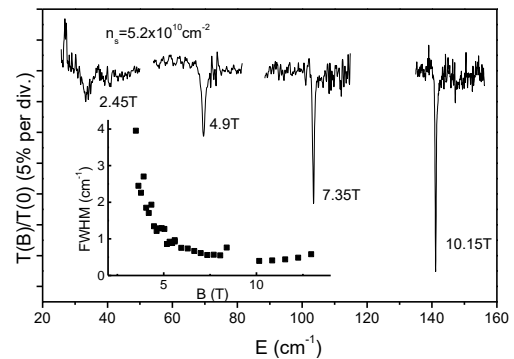


Рис. 2. Спектры поглощения при фиксированных магнитных полях и ширина линии в зависимости от магнитного поля

## Литература

1. Е.М. Baskin, М. V. Entin // Physica B, V. 249-251, 805 (1998).

# Поглощение и фотолюминесценция в инфракрасном диапазоне в легированных квантовых точках GeSi/Si

М.Я. Винниченко<sup>1,\*</sup>, И.С. Махов<sup>2</sup>, Р.В. Устименко<sup>1</sup>, Д.А. Фирсов<sup>1</sup>, А.А. Саркисян<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Кантемировская, 3, Санкт-Петербург, 194100, Россия.

<sup>3</sup> Российско-Армянский университет, ул. Овсепя Эмина, 123, Ереван, 0051, Армения.

\*mvin@spbstu.ru

В работе представлены спектры межзонной фотолюминесценции в структурах с квантовыми точками GeSi/Si разного уровня легирования при разных температурах и уровнях оптической накачки. Обнаружен голубой сдвиг пика, соответствующего непрямому переходу в реальном пространстве, с ростом уровня фотовозбуждения, который объясняется изменением изгиба зон на гетерогранице при высоких концентрациях носителей заряда. В инфракрасных спектрах равновесного и фотоиндуцированного поглощения света идентифицированы пики, соответствующие выбросу дырок из квантовых точек, а также межуровневым переходам дырок в квантовых точках.

## Введение

Работа посвящена исследованию оптических характеристик перспективных нульмерных систем на основе квантовых точек (КТ) GeSi/Si. Данные квантовые точки являются, с одной стороны, достаточно сложными объектами, в которых возможно экспериментальное наблюдение различных квантово-механических эффектов. С другой стороны, эта система материалов является крайне перспективной с точки зрения потенциальных применений в области оптоэлектроники ближнего и среднего инфракрасных диапазонов, совместимой со стандартной кремниевой технологией [1, 2].

В данной работе приводятся экспериментальные результаты по исследованию влияния оптической накачки и температуры на межзонную фотолюминесценцию (ФЛ) в КТ GeSi/Si, связанную с прямыми и непрямыми в реальном пространстве переходами носителей заряда.

Исследованы также равновесное и фотоиндуцированное поглощение в КТ в среднем ИК диапазоне при разных температурах и интенсивностях оптической накачки.

## Образцы и методика эксперимента

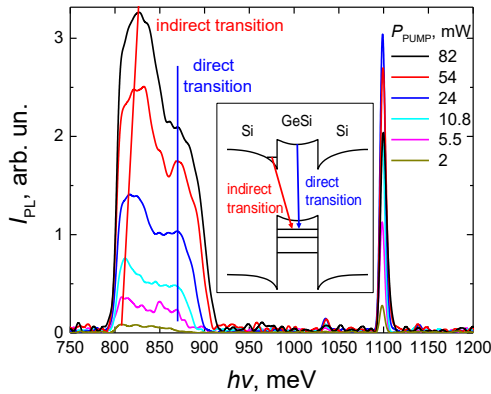
Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si(100) были выращены 10 слоев КТ GeSi, разделенных слоями собственного кремния толщиной 15 нм. Формирование Ge КТ проводилось с применением сурфактанта (Sb) с целью повышения

плотности массива КТ по методу, описанному в [3]. Были выращены четыре структуры с разным уровнем легирования КТ акцепторами: 0, 4, 8,  $12 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Для сравнения использовалась Si подложка без квантовых точек. Для измерений спектров поглощения образцы были выполнены в многопроходной геометрии. С этой целью две противоположные грани образца были сточены под углом 45 градусов. Измерения проводились с помощью вакуумного фурье-спектрометра. Для исследований при криогенных температурах использовался криостат замкнутого цикла.

## Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены спектры межзонной ФЛ нелегированной структуры с КТ при разных интенсивностях оптической накачки. Для легированных структур зависимости выглядят схожим образом. На вставке к рисунку 1 схематично представлена зонная диаграмма КТ в направлении роста структуры, синей и красной стрелками показаны прямые и непрямые в реальном пространстве межзонные переходы электронов. Пик ФЛ в области энергии кванта  $\sim 1100 \text{ мэВ}$  был обнаружен не только в образцах с КТ, но и в референсном образце без КТ и связан с излучательной рекомбинацией непрямых экситонов в кремнии или с фоновыми репликами [4]. На спектрах ФЛ обнаружен голубой сдвиг пика, соответствующего непрямому переходу, с увеличением оптической накачки, который объясняется изгибом зон на гетерогранице Si/Ge при высоких концентрациях

носителей заряда. Наблюдаемый сдвиг пика увеличивается с ростом уровня легирования. Отметим, что интенсивность ФЛ, связанной с прямыми в реальном пространстве переходами, ниже, что может быть связано с меньшей концентрацией неравновесных электронов, участвующих в рекомбинации.

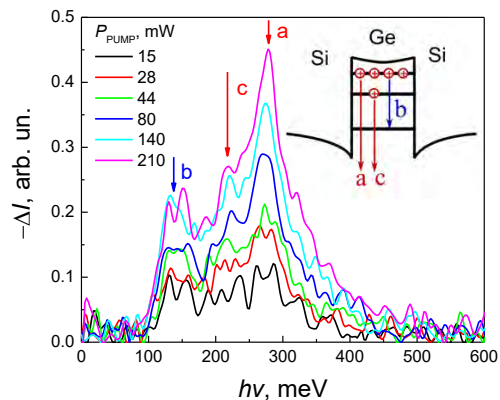


**Рис. 1.** Спектры межзонной фотолюминесценции нелегированной структуры с КТ при разных интенсивностях оптической накачки  $P_{\text{PUMP}}$  при  $T = 4$  К. На вставке схематично приведена зонная диаграмма КТ в направлении роста структуры. Стрелками показаны прямые (direct) и непрямые (indirect) в реальном пространстве переходы

Были также измерены температурные зависимости спектров ФЛ. Увеличение температуры приводит к спаду интенсивности ФЛ для обоих типов переходов. Интенсивность пика ФЛ, связанной с прямой в реальном пространстве электрон-дырочной рекомбинацией, спадает намного быстрее. Это может быть связано с более интенсивной температурной депопуляцией электронных состояний, слабо локализованных непосредственно в КТ, по сравнению с состояниями, локализованными в потенциальных ямах на гетероинтерфейсе.

В равновесных поляризованных спектрах поглощения обнаружены два пика, связанные с выбросами дырок из основного и возбужденного состояний КТ (отмечены стрелками «а» и «с» на вставке к рисунку 2). С увеличением температуры происходит уменьшение поглощения, связанное с уменьшением концентрации носителей заряда как на основном, так и на возбужденном уровнях. Стоит отметить, что более интенсивное температурное гашение проявляется для пика поглощения, связанного с переходами с возбужденных состояний, в более легированных образцах.

В спектрах изменения интенсивности света, прошедшего через образец, в условиях внешней оптической накачки (см. рисунок 2) помимо пиков, связанных с выбросами носителей заряда из КТ, присутствует пик «b», связанный с поглощением света в КТ при межуровневых переходах дырок. Относительное изменение фотоиндуцированного поглощения при температуре 4 К для переходов, связанных с выбросом носителей заряда из КТ, составляет около 1% для нелегированной структуры и около 0,5% для легированных структур при мощности накачки 200 мВт.



**Рис. 2.** Спектры фотоиндуцированного пропускания света  $p$ -поляризации структурой с КТ, легированными до уровня  $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , при разных уровнях оптической накачки. На вставке представлена схема оптических переходов

Полученные экспериментальные данные позволили определить положение уровней дырок в квантовых точках. Проведенные исследования могут быть полезны при разработке детекторов среднего инфракрасного излучения на базе наноструктур с КТ Ge/Si. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-52-05004), комитета по науке РА (грант SCS 20RF-041) и Минобрнауки РФ (государственное задание).

## Литература

1. W. W. Chow, F. Jahnke // Progress in quantum electronics, 37(3), 109-184 (2013).
2. D. Bimberg, U. W. Pohl // Materials Today, 14(9), 388-397 (2011).
3. A. Tonkikh, N. Zakharov, V. Talalaev, P. Werner // Phys. Status Solidi RRL, 4, 224 (2010).
4. B. Adnane *et al.* // Applied Physics Letters, 96(18), 181107 (2010).

# Темновые токи униполярных NBvN структур на основе HgCdTe

А.В. Войцеховский<sup>1, §</sup>, С.Н. Несмелов<sup>1</sup>, С.М. Дзядух<sup>1</sup>, Д.И. Горн<sup>1</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>1-3, \*</sup>, С.А. Дворецкий<sup>1, 2</sup>, Р.В. Меньшиков<sup>2</sup>, Г.Ю. Сидоров<sup>1, 2</sup>, И.Н. Ужаков<sup>2</sup>, М.В. Якушев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет, пр. Ленина 36, Томск, Россия, 634050.

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, пр. Лаврентьева 13, Новосибирск, Россия, 630090.

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090.

\*vav43@mail.tsu.ru, §mikhailov@isp.nsc.ru

В работе приводятся результаты экспериментального исследования NBvN-структур созданных на основе эпитаксиальной пленки твердых растворов теллурида кадмия и ртути ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) с содержанием CdTe  $x=0.303$  в поглощающем v-слое толщиной 4.4 мкм, перспективных для создания эффективных приемников излучения среднего (3-5 мкм) инфракрасного диапазона, работающих при повышенных температурах.

Фундаментальные свойства полупроводникового твердого раствора теллурида кадмия и ртути  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  обеспечивают его широкое применение при создании высокочувствительных инфракрасных детекторов, действующих в различных спектральных областях ИК диапазона. Создание униполярных барьерных структур с одной стороны потенциально позволяет повысить рабочую температуру детекторов, а с другой дает существенные технологические преимущества [1]. Публикации о практических попытках создания детекторов на основе униполярных барьерных pVn-структур на основе МЛЭ HgCdTe стали появляться уже достаточно давно [2, 3], но до сих пор результаты исследований показывают необходимость дальнейшего усовершенствования технологического цикла создания подобных структур для уменьшения влияния компоненты тока связанной с поверхностной утечкой и уменьшения времени жизни Шокли-Рида-Холла. В докладе представлены результаты исследования MWIR NBvN-структур на основе HgCdTe, выращенного методом МЛЭ на подложках из GaAs (013).

## Образцы и методики эксперимента

Выращивание эпитаксиальной пленки  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  осуществлялось на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М» с эллипсометрическим контролем толщины и состава растущих слоев in-situ. В процессе роста на подложке GaAs (013) сначала были сформированы буферные слои ZnTe и CdTe (толщиной 30 нм и 5.5 мкм, соответственно) для согласования постоянных кристаллических решеток, а затем последовательно слой за слоем выра-

щивались: широкозонный нижний  $N_2$ -слой; поглощающий v-слой; барьерный V-слой; покрывающий (контактный)  $N_1^+$ -слой с повышенным уровнем легирования индием. При росте барьерного слоя для получения резкой гетерограницы производилась остановка технологического процесса с изменением технологических ростовых параметров (до десятка минут) и степень размытия гетерограницы не превышала нескольких нанометров. Для данной серии образцов в содержание CdTe поглощающем v-слое толщиной 4.4 мкм находилось в районе 0.303, а внедряемая в процессе роста концентрация индия составляла величину  $3,22 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Схематическое изображение расположения слоев NBvN-структуры изображено на рисунке 1 (а).

Для физического разделения исследуемой пленки на отдельные структуры проводилось жидкостное травление поверхности  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , в результате чего получались отдельные меза-структуры. Для осуществления возможности анализа влияния боковой поверхности на характеристики, проводилось формирование структур различного диаметра: 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50 и 20 мкм. В результате для каждого типоразмера имеется свое отношение периметра к площади структуры, определяющей вклад границы раздела на боковых поверхностях меза-структур. Схематическое изображение распределения исследуемых образцов по поверхности структуры изображено на рисунке 1 (б). После этого проводилась пассивация всей поверхности структуры диэлектрическим покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который наносился наносится методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения (PE ALD) при температуре образца 120 °С.



Для формирования МДП-структур на основе пленок NBvN на поверхность  $Al_2O_3$  напылялись металлические электроды из индия. Для создания обычных NBvN-структур перед напылением металлических электродов проводилось вскрытие контакта.



Рис. 1. Схематическое представление расположения слоев (а) и электродов (б) NBvN-структуры

## Результаты и обсуждение

Для изготовленных образцов измерялись ВАХ на различных температурах, а также температурные зависимости плотности тока при различных напряжениях. Для выявления влияния поверхностной утечки определялись зависимости тока от отношения  $P/A$ , где  $P$  – периметр,  $A$  – площадь мезоструктуры. МДП-структуры изготовленные на основе пленок NBvN использовались для проведения исследования свойств данных пленок методом спектроскопии адмиттанса. На основании измерения ВАХ были построены графики Аррениуса при различных напряжениях смещения. Определенные величины энергии активации соответствуют значению, близкому к ширине запрещенной зоны.

Для выделения из общего тока структуры компонент, связанных с объемной плотностью тока и плотностью тока поверхностной утечки, были проведены измерения зависимости плотности темнового тока от отношения периметра к площади NBvN-структур при температуре 295 К. Плотность тока поверхностной утечки определяется из наклона прямой, а точка пересечения с осью ординат дает значение объемной компоненты тока.

При исследовании температурных зависимостей адмиттанса на различных частотах переменного тестового сигнала были обнаружены две группы максимумов нормированной дифференциальной проводимости (рисунок 2), соответствующие двум энергиям активации носителей заряда. Для обнаруженных групп максимумов нормированной диффе-

ренциальной проводимости были построены графики Аррениуса. Энергии активации, определенные по углу наклона, составили величины 0.295 эВ и 0.357 эВ.

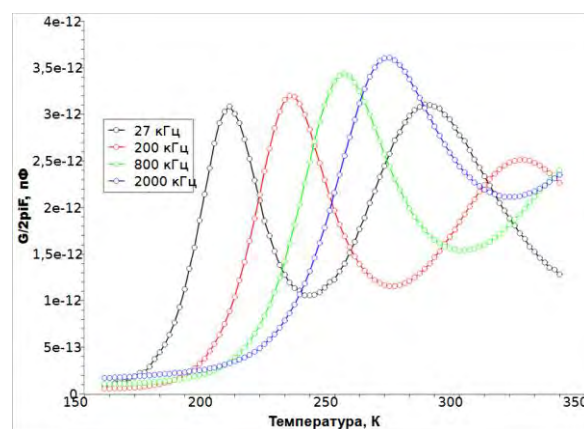


Рис. 2. Температурные зависимости приведенной проводимости МДП-структуры на основе пленки NBvN, измеренные на различных частотах в режиме обогащения

Проведенные экспериментальные исследования NBvN-структур, изготовленных на основе МЛЭ  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с содержанием CdTe в поглощающем слое 0.303, показали перспективность использования данных пленок для создания эффективных приемников излучения среднего (3-5 мкм) инфракрасного диапазона, работающих при повышенных температурах. Используемые для получения структур на основе данных материалов параметры технологических операций позволили получить низкую плотность тока поверхностной утечки ( $1.44 \cdot 10^{-7}$  А/см) при плотности объемной компоненты равной  $8.57 \cdot 10^{-4}$  А/см. Проведение адмиттансных исследований позволило определить энергии активации носителей заряда, которые составили величины 0.295 эВ и 0.357 эВ, что достаточно близко к ширине запрещенной зоны в поглощающем слое.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект № 19-12-00135).

## Литература

1. Maimon S., Wicks G.W. // Appl. Phys. Lett., V. 89, 151109 (2006).
2. Itsuno A.M., Phillips J.D., Velicu S. // Appl. Phys. Lett., V. 100, 161102 (2012).
3. Velicu S., Zhao J., Morley M., et al. // Proc. SPIE, V. 8268, 826282X (2012).

# Свойства магнитоплазмон-поляритонов в 2D электронных системах с тыловым затвором

В.А. Волков<sup>1,\*</sup>, А.А. Заболотных<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11-7, Москва 125009.

\* Volkov.v.a@gmail.com

Исследовано взаимодействие экранированных 2D магнитоплазмонов с фотонными модами в естественном волноводе, представляющем собой диэлектрическую подложку, отделяющую двумерную (2D) электронную систему от тылового затвора (back-gate). При достаточно больших толщинах подложки и/или высоких концентрациях электронов скорость квазистатических экранированных плазмонов может быть большой (и даже сколь угодно сильно превышать скорость света). Это ведет к необходимости учета сильного электромагнитного запаздывания, что, в свою очередь, обеспечивает эффективное связывание 2D плазмонов с волноводными модами Фабри-Перо. Исследована дисперсия и магнитодисперсия полученных поляритонов.

Рассмотрены свойства 2D магнитоплазмонов, бегущих вдоль бесконечной двумерной электронной системы, параллельно которой расположен идеально проводящий электрод (затвор), при учете принципиально важной роли подложки. К настоящему времени плазмон-поляритоны в экранированных 2D электронных системах исследованы относительно мало. Причина состоит в следующем. Мерой запаздывания для плазмонов в таких системах является безразмерный параметр, равный отношению (квазистатической) скорости плазменных колебаний к скорости света в подзатворном диэлектрике толщиной  $d$ . В стандартных экранированных структурах с  $d \approx 100$  нм это отношение мало, и, соответственно, влияние электромагнитного запаздывания на экранированные плазменные колебания пренебрежимо мало. Под стандартными структурами подразумеваются структуры с фронтальным затвором («gated» structures).

Тем не менее, совсем недавно экранированные плазмоны в режиме существенного запаздывания, когда вышеуказанный параметр запаздывания превышал единицу, удалось исследовать экспериментально [1]. Для этого использовались структуры с тыловым затвором («back-gated structures»), в которых величина  $d$ , равная толщине подложки, достигала величины 640 мкм. Важно, что при этом был реализован режим сильной экранировки, когда величина  $d$  оставалась еще малой по сравнению с длиной волны плазмона. В связи с этим в настоящем докладе де-

тально исследуется структура магнитоплазмон-поляритонных мод в бесконечной экранированной 2D системе в структурах с тыловым затвором, в том числе, и в режиме сильного запаздывания.

В отсутствие магнитного поля взаимодействие 2D плазмонов с модами диэлектрического волновода (подложки), приводит к формированию семейства волноводных плазмон – поляритонных мод, две нижние из которых обладают бесщелевой дисперсией и ТМ симметрией. Постоянное магнитное поле, ортогональное плоскости системы, гибридизирует разные моды. Тем не менее, разделение всех мод на продольные и поперечные (ТМ-ТЕ классификация), обычно справедливо лишь в отсутствие магнитного поля, восстанавливается в пределе сильных полей. В работе найдены спектры и магнитодисперсия полученных 2D мод. На результаты существенно влияет магнитополевая дисперсия частот отсечки волновода. Даже слабое магнитное поле открывает частотную щель, линейную по  $B$ , в спектре одной из нижних магнитоплазмон - поляритонных мод. Эта щель равна частоте перенормированного циклотронного резонанса. С ростом поля величина щели выходит на плато.

Работа поддержана грантом РФФ 21-12-00287.

## Литература

1. I. V. Andreev, V. M. Muravev, N. D. Semenov, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 103, 115420 (2021).

# Джозефсоновский спектральный анализ излучения ТГц квантовых каскадных лазеров

О.Ю. Волков<sup>1</sup>, И.Н. Дюжиков<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2</sup>, Ю.Я. Дивин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11-7, Москва, 125009.

<sup>2</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Нагорный пр., 7-5, Москва, 117105.

\*yyd@cplire.ru

С помощью джозефсоновских переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и метода гильберт-спекроскопии исследованы спектры излучения терагерцовых (ТГц) квантовых каскадных лазеров (ККЛ) при различных токах инжекции. Обнаружено, что, наряду с набором резонансных линий при ТГц частотах  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), в спектрах присутствуют и низкочастотные компоненты с разностными частотами  $f_k - f_m$ . Количество отдельных линий и их интенсивность в низкочастотной и высокочастотной частях спектра немонотонно зависят от тока инжекции через ККЛ. Обнаруженная генерация разностных частот (DFG) свидетельствует о наличии нелинейных эффектов второго порядка в поляризуемости активной области ККЛ.

## Введение

Идея квантового каскадного лазера (ККЛ) [1] оказалась одной из наиболее успешных в современных терагерцовых (ТГц) технологиях. Излучение из ТГц ККЛ наблюдалось в частотном диапазоне от 1,2 до 5,4 ТГц. Однако, это излучение имеет полихроматический характер и сложную диаграмму направленности, что связано с наличием резонансных мод в активном объеме ККЛ. Кроме того, вследствие нелинейных эффектов в активном объеме ККЛ возможны процессы преобразования генерируемых частот, что может еще расширить спектральную область и диаграмму направленности излучения.

В таком случае, исследовать спектры излучения из ККЛ и, соответственно, их нелинейную динамику предпочтительно с помощью методов, работающих в частотном пространстве.

В данной работе представлены результаты исследования излучения ТГц ККЛ с помощью нестационарного эффекта Джозефсона.

## Методика эксперимента

Для исследования излучения ККЛ мы использовали метод гильберт-спекроскопии [2], в котором спектр излучения  $S(f)$  получают после применения обратного преобразования Гильберта к измеренному детекторному отклику  $\Delta I(V)$  джозефсоновского перехода (ДП) следующим образом

$$S(f) \sim \left(\frac{1}{\pi}\right) P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(f_j) df_j}{f_j - f} \quad (\Phi 1)$$

где  $H(f_j) = 2\Delta I(f_j)I_0(f_j) f_j / \pi f_c^2$  - нормированная функция отклика, которая состоит из произведения джозефсоновской частоты  $f_j = 2eV/h$  ( $V$  - напряжение на переходе), отклика  $\Delta I(V)$  и ВАХ  $I_0(V)$  как функций  $f_j$ , деленного на квадрат характеристической джозефсоновской частоты  $f_c = 2eI_c R_n / h$ .

Исследовались спектры излучения двух ККЛ с активной областью GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As [3]. Активная область (рис. 1а) имеет ширину 100 мкм, высоту 10 мкм и окружена металлическим волноводом Au-Au. Длина ККЛ1 составляла 2,5 мм, а у ККЛ2 - 1 мм.

Мы использовали бикристаллические ДП, сформированные из эпитаксиальных тонких  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) пленок в виде мостика шириной 1,5 мкм через бикристаллическую границу (штриховая линия) на NdGaO<sub>3</sub> подложке (рис. 1б) [3].

Логопериодическая антенна из Au пленки интегрирована с ДП. Переходы имели сопротивления  $R_n = (2 \div 7)$  Ом и характерное напряжения  $I_c R_n$  (50К) до 1 мВ.

ККЛ и ДП монтировались друг против друга в вакууме на одной криопанели азотного криостата, снабжались фокусирующими линзами и окружающим их световодом. Измерения проводились при температурах (50÷54) К, достигаемых откачкой паров азота, согласно схеме, представленной на рис.1 справа [3].

Использовалась импульсная инжекция тока ККЛ с длительностью 2 мкс и временами повторения от 0,4 до 2 мс.

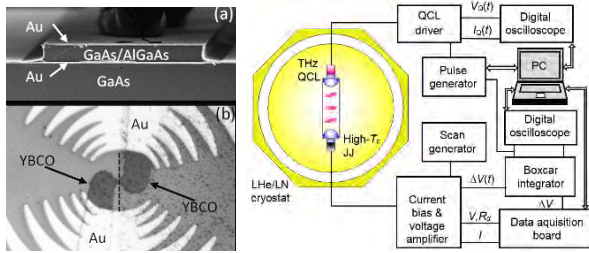


Рис. 1. Микрофотографии лазера,  $135 \times 56 \mu\text{m}^2$  (a) и перехода с антенной,  $108 \times 64 \mu\text{m}^2$  (b). Справа: блок-схема [3]

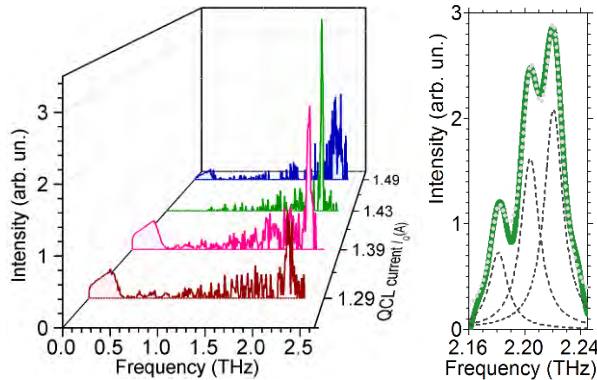


Рис. 2. Спектры  $S(f)$  излучения ККЛ1 при различных токах  $I_Q$  [4] и детализация спектра при  $I_Q = 1,45$  А [3]. Измерено с помощью ДП с  $R_n = 6,9$  Ом и  $I_c R_n = 1$  мВ при  $T = 50$  К

## Результаты

На рис. 2 показаны спектры излучения ККЛ2, восстановленные по экспериментальным данным для ДП с  $R_n = 6,9$  Ом согласно (ф1). Спектр, измеренные от 0 до 2,5 ТГц (слева), имеют две основные части: одна - ожидаемо вблизи частоты  $f \cong 2,2$  ТГц, а другая - состоит из компонент с  $f < 400$  ГГц. Доминирующая ТГц часть достигает максимальной интенсивности и минимальной ширины в узком диапазоне токов инжекции около оптимального  $I_Q = (1,44 \pm 0,01)$  А. Детализация спектра в этом случае (рис. 2, справа) показывает, что наблюдаются всего лишь три линии генерации при резонансных частотах  $f_{m,p}$  активного объема ККЛ. При этом, НЧ часть спектра отсутствует. При повышении или уменьшении  $I_Q$  от оптимального, количество линий в части спектра около 2,2 ТГц увеличивается, их интенсивности уменьшаются и при этом появляется НЧ часть. Внутренняя структура НЧ части спектра у данного ККЛ1 не обнаруживается из-за большой ширины линии джозефсоновской генерации  $\delta f(f) \gg (f_{m,p} - f_{m',p'})$  при  $f_j < 400$  GHz у ДП с  $R_n = 6,9$  Ом.

На рис. 3 представлены спектры для ККЛ2 с меньшей длиной  $L=1$  мм и большей минимальной межмодовой разницей частот  $f_{m+1,0} - f_{m,0} = c/2nL \cong 44$  GHz. ТГц часть спектра ККЛ (Рис.3b) измерялась фурье-

спектроскопией, а часть с  $f < 400$  GHz - ДП с  $R_n = 2,8$  Ом (Рис. 3а). На нижней панели видно, что при изменении токов инжекции  $I_Q$  от 1.006 А до 1.082 А ТГц основная генерация наблюдается на 3 частотах  $f_0 = 3.295$  ТГц;  $f_1 = 3.163$  ТГц и  $f_2 = 2.984$  ТГц. Спектры для тех же токов  $I_Q$  на верхней панели показывают генерацию на 132 ГГц, 179 ГГц, 241 ГГц и 311 ГГц. Из сопоставления спектров видно, что частота  $f = 132$  ГГц на верхней панели равна разности частот  $f_0 - f_1$ , частота 179 ГГц равна  $f_1 - f_2$ , а частота 311 ГГц

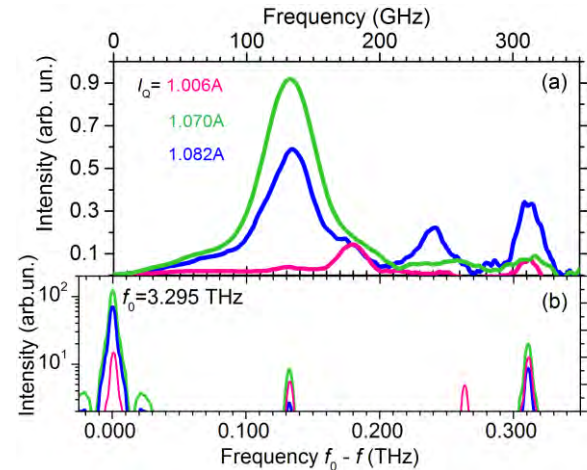


Рис. 3. Спектры  $S(f)$  излучения ККЛ2, полученные с помощью ДП с  $R_n = 2,8$  Ом и  $I_c R_n = 0,4$  мВ (a), и спектры  $S(f_0 - f)$ , полученные фурье-спектроскопией (b) при тех же токах  $I_Q$

равна  $f_0 - f_2$ . Эти частоты линий на рис. 3а хорошо аппроксимируются набором  $n \times 44,4$  ГГц ( $n = 3, 4, 7$ ), что указывает на принадлежность образующих их частот к семейству  $f_{m,0}$  основных продольных мод. Линия с частотой 241 ГГц образуется из семейства других мод с частотами  $f_{m,p}$ .

Мы полагаем, что интенсивные электрические ТГц поля  $E(t)$  внутри ККЛ вызывают нелинейные эффекты в поляризации  $P(t)$  активного объема ККЛ:  $P(t) = \epsilon_0 \sum_k \chi^{(k)} E^k(t)$ , где  $\chi^{(k)}$  - восприимчивость  $k$ -того порядка [4]. Тогда, наряду с двумя монохроматическими компонентами  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$  с частотами  $f_1, f_2$ , в ККЛ возникает и генерация разностной частоты (DFG) с  $f_d = f_2 - f_1$  и  $P(f_2 - f_1) = 2\epsilon_0 \chi^{(2)} E_1 E_2^*$  [4], что наблюдалось нами и показано на рис. 3.

Мы продемонстрировали потенциал джозефсоновских переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и метода гильберт-спектроскопии для исследования нелинейной динамики ККЛ при частотах от 100 ГГц до единиц ТГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ РАН № 0030-2019-0003.

**Литература**

1. Р. Ф. Казаринов, Р. А. Сурис // ФТП, Т.5, С.707 (1971).
2. Ю. Я. Дивин, О. Ю. Полянский, А. Я. Шульман // Письма ЖТФ, Т. 6, С. 1056 (1980).
3. O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Gundareva, *et al.* // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., V. 11, pp. 330-337 (2021).
4. O. Volkov, V. Pavlovskiy, and Y. Divin. // IEEE Trans. Appl. Supercond. (Early Access) (2022).



# Влияние термического отжига на транспортные свойства низкобарьерных диодов Мотта Ti/AlGaN/GaN

Н.В. Востоков\*, М.Н. Дроздов, С.А. Краев, О.И. Хрыкин, П.А. Юнин

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*vostokov@ipm.sci-nnov.ru

Показано, что термический отжиг дает дополнительные возможности для управления эффективной высотой барьера низкобарьерных диодов Ti/AlGaN/GaN, улучшения и тонкой настройки их транспортных характеристик. Отжиг может использоваться для изготовления диодов, предназначенных для работы при высоких температурах.

## Введение

Низкобарьерные диоды Шоттки (Мотта) являются перспективными нелинейными элементами для высокоэффективных устройств детектирования, смещения и выпрямления микроволновых сигналов. Специфика широкозонных нитридов заключается в возможности создания приборов, работающих при высоких температурах, воздействии радиации и в агрессивных средах.

В недавней нашей работе [1] была экспериментально показана возможность снижения эффективной высоты барьера Мотта к гетероструктуре AlGaN/GaN за счет поляризационно-индуцированного  $\delta$ -легирования гетероперехода. Положительный поляризационный заряд, расположенный в плоскости гетерограницы AlGaN/GaN, формирует потенциальный рельеф с туннельно-прозрачным трапециевидным барьером у границы с металлом, что уменьшает эффективную высоту барьера диода. Эффект демонстрируется на рис. 1, где схематично показаны координатные зависимости положения дна зоны проводимости в диодных

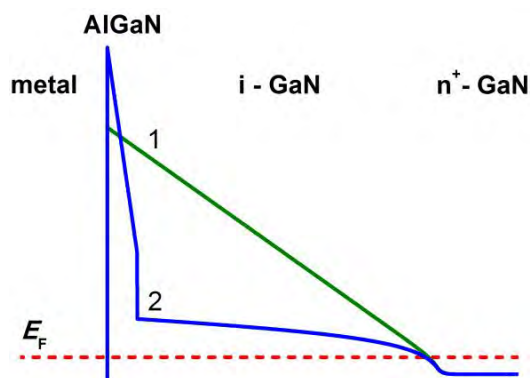


Рис. 1. Зонные диаграммы диодных гетероструктур: металл/GaN – кривая 1; металл/AlGaN/GaN – кривая 2

гетероструктурах: кривая 1 — для обычного диода Мотта металл/GaN; кривая 2 — для низкобарьерного диода металл/AlGaN/GaN. С использованием данного подхода были изготовлены низкобарьерные диоды Ti/AlGaN/GaN с высокими значениями ампер-ваттной чувствительности  $\alpha = -\frac{1}{2}R'/R$  при малой удельной величине дифференциального сопротивления  $R$  при нулевом смещении. Настоящая работа посвящена изучению влияния термического отжига на транспортные свойства таких диодов.

## Методика эксперимента

Полупроводниковые гетероструктуры выращивались методом металлоорганической газовой эпитаксии на сапфировых подложках с ориентацией плоскости  $c$  (0001) параллельно поверхности подложки. Перед формированием рабочих слоев гетероструктуры выращивался низкотемпературный зародышевый слой GaN. Далее следовали: сильно легированный  $n^+$ -слой GaN толщиной 2 мкм; нелегированный  $i$ -слой GaN толщиной 120 нм; нелегированный слой  $Al_xGa_{1-x}N$  толщиной  $d = 0 \div 3$  нм. Барьерные контакты диодов Au/Ti формировались на поверхности гетероструктур методом электронно-лучевого испарения. Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) использовались контакты диаметром 5 мкм. Более подробно технология изготовления диодов описана в [1]. Термический отжиг диодов проводился на установке AccuThermo AW410 в атмосфере высокочистого аргона.

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены ВАХ трех диодов D1, D2 и D3. D1 это обычный диод Мотта Ti/GaN. Определен-

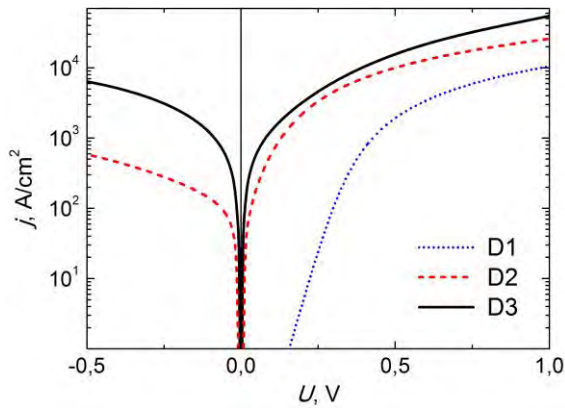


Рис. 2. ВАХ диодов D1, D2 и D3

ные по ВАХ высота барьера диода составляет 0.52 эВ, фактор неидеальности 1.09. Добавление в полупроводниковую структуру слоя  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$  толщиной  $d = 1$  нм на границе с металлом приводит к увеличению прямого тока диода на много порядков величины — диод D2. Этот диод имеет при нулевом смещении высокое значение  $\alpha = 9$  А/Вт при малой величине  $R = 4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{см}^2$ . Диод D3 подобен D2, но с более толстым слоем AlGaN и более высоким содержанием Al:  $d = 2.3$  нм,  $x = 0.3$ . D3 имеет ВАХ близкую к симметричной вблизи нулевого смещения (величина  $\alpha$  близка к нулю). Это связано с тем, что приложенное напряжение в основном падает между металлом и вырожденным двумерным электронным газом (2DEG), сформированным вблизи гетерограницы AlGaN/GaN. Как оказалось, диод D3 можно сделать выпрямляющим с помощью термического отжига.

На рис. 3 показаны зависимости  $R$  и  $\alpha$  диода D3 от напряжения до и после последовательно проводившихся процессов отжига. Отжиг при температуре  $300^\circ\text{C}$  в течение 5 минут привел к росту сопротивления и выпрямляющей ВАХ диода ( $\alpha = 4$  А/Вт при нулевом смещении), из-за роста высоты барьера Ti/AlGaN и исчезновению 2DEG. Такое увеличение высоты барьера Шоттки в результате отжига структур с контактами Ti/(Al)GaN при температурах ниже  $400^\circ\text{C}$  описано в литературе и связано с химическим взаимодействием межфазного оксидного слоя с титаном, что приводит к образованию более тесного контакта [2,3]. Последующий отжиг диода при температуре  $500^\circ\text{C}$  в течение 5 минут привел к дальнейшему росту  $\alpha$ , но уменьшению  $R$  ( $R = 6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{см}^2$ ,  $\alpha = 5$  А/Вт при нулевом смещении) из-за диффузии азота в металл, образования сильнолегированного вакансиями азота приконтактного слоя полупроводника и сниже-

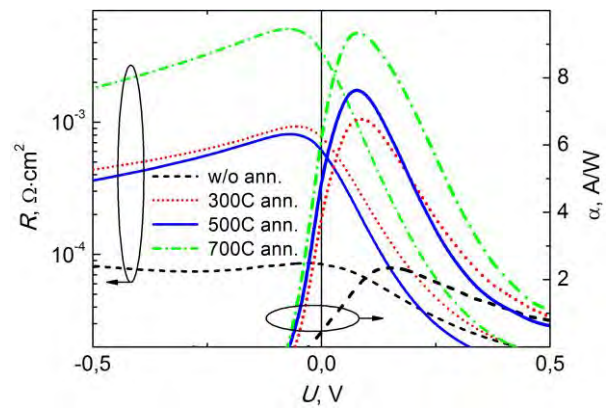


Рис. 3. Зависимости удельного дифференциального сопротивления и ампер-ваттной чувствительности диода D3 от напряжения до и после последовательно проводившихся процессов отжига

ния эффективной высоты барьера диода [3,4]. После отжига при температуре  $700^\circ\text{C}$  в течение 1 минуты сопротивление диода снова выросло, что может быть связано с деградацией поляризационных свойств слоя AlGaN из-за химического взаимодействия с титаном.

Проведенные исследования показывают, что термический отжиг может оказывать сильное влияние на дифференциальное сопротивление и нелинейные свойства низкобарьерных диодов. Это дает дополнительные возможности для управления транспортными характеристиками диодов и их тонкой настройки. Отжиг может использоваться для «заковки» диодов, предназначенных для работы при высоких температурах.

Исследования проведены в рамках выполнения государственного задания ИФМ РАН (тема № 0030-2021-0023). В работе использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур».

## Литература

1. N.V. Vostokov, M.N. Drozdov, O.I. Khrykin *et al.* // Appl. Phys. Lett., V. 116, 013505 (2020).
2. M.T. Hirsch, K.J. Duxstad, E.E. Haller // Electron. Lett., V. 33, 95 (1997).
3. S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa *et al.* // IEEE Trans. Electron Devices, V. 48, 573 (2001).
4. Q.Z. Liu and S.S. Lau // Solid-State Electron., V. 42, 677 (1998).

# Фёрстеровский перенос энергии в нанокластерах коллоидных квантовых точек

А.В. Гадомская<sup>1</sup>, Д.К. Юлдашева<sup>3</sup>, М.Г. Спири́н<sup>1</sup>, С.А. Товстун<sup>1, 2, \*</sup>, В.Ф. Разумов<sup>1, 2</sup>

1 Институт проблем химической физики РАН, просп. Академика Семенова, 1, Черноголовка, 142432.

2 Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, 141701.

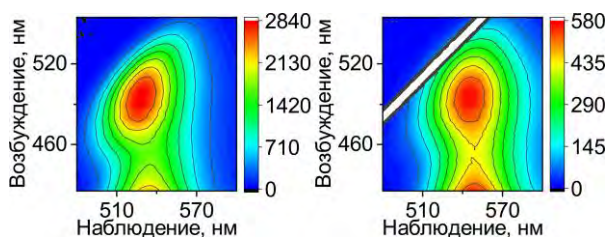
3 Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 119991.

\*tovstun@icp.ac.ru

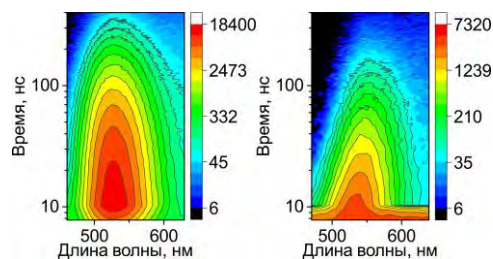
Синтезированы коллоидные квантовые точки фосфида индия среднего диаметра 2 нм с тонкой оболочкой сульфида цинка и лигандной оболочкой из олеиламина. Добавлением ацетонитрила в раствор этих частиц в толуоле осуществлена их контролируемая агрегация с образованием стабильных нанокластеров диаметром ~170 нм. Для этих нанокластеров, а также для исходных неагрегированных частиц были измерены время-разрешённые спектры люминесценции и матрицы возбуждение-люминесценция. Анализ полученных данных позволил определить профиль неоднородного уширения и однородную форму спектров поглощения и люминесценции наночастиц, а также характеристики фёрстеровского безызлучательного переноса энергии в нанокластерах.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) представляют собой полупроводниковые нанокристаллы, проявляющие квантово-размерный эффект зависимости положения края поглощения и имеющие лигандную оболочку, придающую им стабильность относительно агрегации. Они интенсивно изучаются как перспективные люминофоры. Существующие методы получения ККТ обычно дают полидисперсные образцы. Полидисперсность в сочетании с квантово-размерным эффектом приводит к неоднородному уширению спектров поглощения, люминесценции и возбуждения люминесценции.

Многие практические применения ККТ подразумевают их использование в виде плотноупакованных слоёв. Люминесцентные свойства таких слоёв существенно отличаются от люминесцентных свойств растворов неагрегированных ККТ из-за фёрстеровского безызлучательного переноса энергии. Из-за неоднородного уширения возбуждение переносится преимущественно от малых частиц к большим, что приводит к сдвигу спектра люминесценции в длинноволновую область. Кроме того, из-за эффекта



**Рис. 1.** Матрицы возбуждение-люминесценция неагрегированных коллоидных квантовых точек InP/ZnS (слева) и нанокластеров (справа)



**Рис. 2.** Время-разрешённые спектры люминесценции неагрегированных коллоидных квантовых точек InP/ZnS (слева) и нанокластеров (справа). Длина волны возбуждения – 400 нм

мерцающей люминесценции в любой конкретный момент времени часть частиц в ансамбле не люминесцирует. Перенос энергии на такие частицы приводит к понижению квантового выхода люминесценции. Спектрально-люминесцентные эффекты переноса энергии в плотноупакованных ансамблях ККТ в данной работе исследовались на примере коллоидных растворов нанокластеров ККТ, которые получались в результате двукратного разбавления ацетонитрилом исходного коллоидного раствора ККТ в толуоле. В качестве ККТ были выбраны частицы InP/ZnS типа ядро/оболочка. Для этих частиц и их нанокластеров были измерены интенсивность люминесценции в зависимости от длин волн возбуждения и наблюдения (Рисунок 1) и зависимость спектра люминесценции от времени после импульсного возбуждения (Рисунок 2). Анализ полученных данных позволил изучить характеристики неоднородного уширения и переноса энергии.

Работа поддержана Российским научным фондом (Проект № 21-73-20245).

# Оптоакустический генератор ультразвука на базе структур с Таммовским плазмоном с добавлением полимерных и гибридных материалов

Е.И. Гиршова<sup>1,2</sup>, Е.П. Микитчук<sup>3</sup>, К.М. Морозов<sup>1,2</sup>, А.В. Белоновский<sup>1,2</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Академический Университет им. Ж.И. Алфёрова, ул. Хлопина, 8/3, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> ИТМО, Кронверский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101.

<sup>3</sup> БГУ, проспект Независимости, 49, Минск, 220030.

\*ilinishna@gmail.com

Теоретически показана целесообразность включения в конструкцию оптоакустического генератора ультразвука дополнительных слоёв полимерных материалов с высокими коэффициентами температурного расширения, а также гибридных металло-полимерных материалов, состоящих из полимерной мембраны с включением наночастиц металла по всему объёму.

## Введение

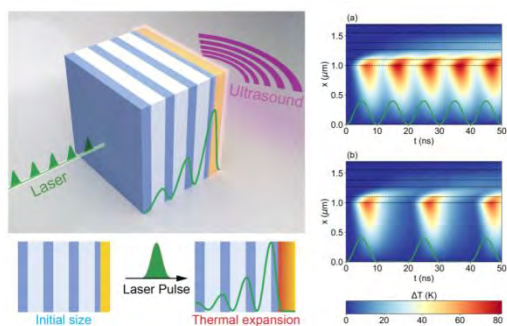
Оптоакустические генераторы ультразвука могут стать привлекательной альтернативой пьезоэлектрическим устройствам, которые преимущественно используются в медицине и дефектоскопии на данный момент. Несомненные плюсы оптоакустических генераторов: миниатюрные размеры, устойчивость к внешним механическим воздействиям, полная гальваническая развязка, возможность реализации на срезе оптоволокна, широкая полоса рабочих частот. Применение полимерных и гибридных материалов может привести к существенному увеличению эффективности энергопреобразования в диапазоне частот, используемом на практике в ультразвуковой диагностике.

## Конструкция генератора

Конструкция оптоакустического генератора на базе структур с таммовским плазмоном состоит из брэгговского отражателя, покрытого слоем металла. Структура освещается лазерным лучом, периодически модулированным во времени. За счёт полного поглощения лазерного излучения на желаемой длине волны обеспечивается периодическое нагревание и охлаждение металлического слоя, которое приводит к циклическому расширению и сжатию, порождающему ультразвуковую волну.

Дизайн прибора и выбор материалов должны одновременно обеспечивать: полное поглощение лазерного излучения на нужной длине волны; эффективный нагрев; адекватную температурную релаксацию; максимальную амплитуду колебаний поверхности. Структуры с Таммовским плазмоном обеспечивают полное поглощение в инфракрасном диапазоне вместо обычно используемого в оптоакустике сине-зелёного, что позволяет использовать полупроводниковые лазеры на основе GaAs (длина волны 980 нм), сочетающие в себе доступность, высокую мощность и возможность прямой временной модуляции интенсивности для частот до нескольких ГГц. На рисунке 1 изображены конструкция оптоакустического генератора (слева) и временное и пространственное распределение повышения температуры  $\Delta T(x, t)$  при периодическом нагреве структуры (а) с синусоидальной модуляцией мощности лазера  $I(t)$  с частотой 100 МГц и средней плотностью потока  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>; (б) с последовательностью синусоидальных импульсов с длительностью 10 нс и частотой повторения 50 МГц и средней плотностью потока  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Зелёная линия показывает временную зависимость плотности лазерного потока  $I(t)$ . Видно, что в первом случае структура не успевает достаточно охладиться между импульсами, что приводит к снижению эффективности энергопреобразования.

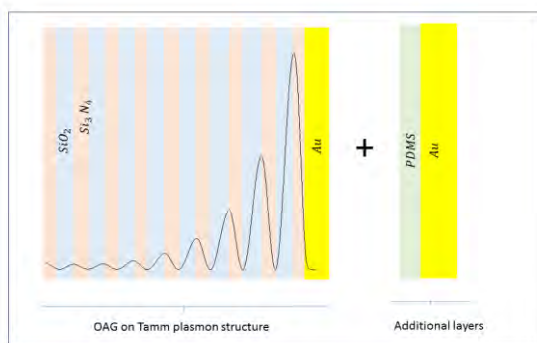




**Рис. 1.** Слева: конструкция оптоакустического генератора. Справа: временное и пространственное распределение повышения температуры  $\Delta T(x, t)$  при периодическом нагреве структуры (а) с синусоидальной модуляцией мощности лазера  $I(t)$  с частотой 100 МГц и средней плотностью потока  $10^6$  Вт /см<sup>2</sup>; (б) с последовательностью синусоидальных импульсов с длительностью 10 нс и частотой повторения 50 МГц и средней плотностью потока  $5 \cdot 10^5$  Вт / см<sup>2</sup>. Зеленая линия показывает временную зависимость плотности лазерного потока

## Полимеры и гибридные материалы

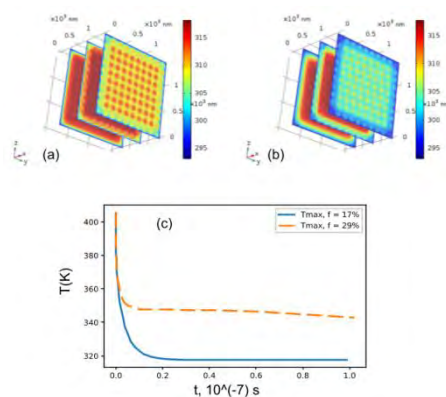
Было рассмотрено усовершенствование прибора путём добавления слоя органического материала (полидиметилсилоксан), имеющего высокий коэффициент температурного расширения.



**Рис. 2.** Фотоплазмонный преобразователь с таммовским плазмоном и дополнительным слоем полидиметилсилоксана (PDMS). Слева изображена структура с таммовским плазмоном, состоящая из брэгговского отражателя, составленного из слоёв оксида кремния (169 нм) и нитрида кремния (122 нм), и металлического слоя толщиной 100 нм. Справа показаны дополнительные слои: полидиметилсилоксан (100 нм) и золото (500 нм). Сплошной линией показано распределение квадрата электрического поля в структуре при облучении лазером на длине волны 980 нм

Моделирование термодинамики структуры при облучении последовательностью лазерных импульсов показало, что это целесообразно на частотах до 50 МГц и может приводить к увеличению эффективности энергопреобразования на 4 порядка на частотах до 50 МГц. Повышение эффективности именно в этом диапазоне имеет прикладное значение.

Также был исследован металлополимер, состоящий из полидиметилсилоксана и наночастиц серебра, рассчитаны его оптические и термодинамические характеристики для разных объёмных долей серебра. Теоретически показано, что материал при объёмной доле серебра около 30 % может быть использован в качестве активной среды оптоакустического преобразователя на частотах, применяющихся в медицине и дефектоскопии на практике (2-30 МГц)



**Рис. 3.** Распределение температуры в структуре с объёмной плотностью наночастиц, равной 29 %, через 40 нс (а) и 60 нс (б). Графики падения температуры со временем при остывании материалов с объёмными плотностями частиц 17% (сплошная линия) и 29% (штрихованная линия)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90188.

## Литература

1. E. Girshova et al., Optics Express, 28(8) 26161 (2020).
2. Е.И. Гиршова и др., Письма в журнал технической физики, 47 14 (2021).



# Оптические и транспортные свойства двумерных дихалькогенидов переходных металлов

М.М. Глазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ул. Политехническая 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*glazov@coherent.ioffe.ru

В докладе будет выполнен обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований оптических и транспортных эффектов в атомарно-тонких кристаллах дихалькогенидов переходных металлов. Основное внимание будет уделено экситонной серии в этих материалах, управлению оптическим откликом в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах, эффектам, связанным с наличием двух долин в энергетическом спектре и киральным правилам отбора при оптических переходах. Будут описаны проявления экситонов в транспортных эффектах. Также будет обсуждаться долинный и спиновый эффекты Холла на электронах и экситонах.

## Введение

Системы с экстремальными физическими свойствами притягивают особый интерес исследователей. Среди экстремально-двумерных систем выделяется графен – монослой атомов углерода и дихалькогениды переходных металлов. Последние описываются общей химической формулой  $\text{MX}_2$ , где  $\text{M}$  – переходной металл, а  $\text{X}$  – халькоген. Диселениды ( $\text{X}=\text{Se}$ ) и дисульфиды ( $\text{X}=\text{S}$ ) молибдена ( $\text{M}=\text{Mo}$ ) и вольфрама ( $\text{M}=\text{W}$ ) обладают схожими физическими свойствами: это прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны около 2 эВ, которая реализуется в точках  $\text{K}_+$  и  $\text{K}_-$  в углах шестиугольной зоны Бриллюэна.

## Оптические свойства. Нейтральные и заряженные экситоны

Относительно большие эффективные массы носителей заряда и слабая экранировка кулоновского взаимодействия приводят к основополагающей роли экситонов в оптическом и отклике таких систем [1,2].

При описании экситонной серии двумерных дихалькогенидов переходных металлов требуется учитывать существенные отклонения закона притяжения электрона и дырки от  $1/r$ , где  $r$  – расстояние между электроном и дыркой в плоскости слоя. Это связано с особенностями экранировки в двумерных системах со значительным диэлектрическим контрастом. Кулоновское притяжение описывается формулой Рытовой-Келдыша [3], а результирующая серия экситонный уровней заметно отличается от двумерной водородоподобной [4]. Энергия связи основного состояния экситона может достигать нескольких сотен

мэВ в зависимости от диэлектрического окружения монослоя.

Также при теоретическом описании экситонных состояний и сил осциллятора следует учитывать неработочность зон, см. [5] и ссылки, приведенные там.

Значительное кулоновское взаимодействие приводит к большим энергиям связи трехчастичных комплексов: заряженных экситонов (трионов) [6]. Энергия связи триона составляет несколько десятков мэВ,  $\text{X}$ -трионы, состоящие из двух электронов и дырки, обладают характерной тонкой структурой (два пика в оптических спектрах), связанных с наличием внутри- и междолинного комплекса [7]. Также в оптических спектрах проявляется широкий круг многочастичных комплексов, включая нейтральные и заряженные биэкситоны. Их стабильность обусловлена сильным кулоновским взаимодействием и наличием наряду со спиновыми, долинных степеней свободы у носителей заряда. В оптических спектрах проявляются и возбужденные состояния трионов, которые являются «резонансными», они подвержены автоионизации [8].

Возможность контроля уровня легирования в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах позволяет проследить роль перенормировок спектра, обусловленных наличием резидентных носителей заряда. В литературе дискутируется вопрос о наиболее адекватном описании эффектов взаимодействия экситонов с ферми-морем электронов или дырок. При низком легировании подход, основанный на рассмотрении трионов, и подход, основанный на рассмотрении ферми-поляронов, оказываются по существу эквивалентными [9].

Интересной и важной для применений особенно-стью оптических спектров монослоев  $\text{MX}_2$  является возможность управления оптическим откликом путем изменения окружения монослоя. Вариации толщин слоев  $\text{hBN}$ , инкапсулирующих монослой, приводят к значительным, на порядок величины изменениям радиационного времени экситона благодаря эффекту Парселла [10].

### Транспортные явления. Диффузия и слабая локализация экситонов

В монослоях дихалькогенидов переходных металлов и гетероструктурах на их основе оказывается возможным изучать транспортные свойства оптическими методами. Простейшим, с одной стороны, и фундаментальным, с другой, является эффект диффузии. В монослоях наблюдается заметное увеличение наблюдаемого коэффициента диффузии экситонов с увеличением их концентрации, это обусловлено эффектами безызлучательной рекомбинации квазичастиц [11]. Возможно также субдиффузионное распространение экситонов [12].

Весьма необычным оказываются проявления квантовой интерференции экситонов на замкнутых траекториях (эффект слабой локализации) в экстремально-двумерных кристаллах в случае, когда основным механизмом рассеяния является взаимодействие экситонов с акустическими фононами. Интерференционная поправка к коэффициенту диффузии, будучи отрицательной, возрастает с увеличением температуры от единиц до десятков Кельвин [13]. Проявления неклассического экситонного транспорта наблюдаются экспериментально [14].

### Спиновые и долинные эффекты. Долинный эффект Холла

Наличие двух долин в энергетическом спектре, связанных операцией инверсии времени, полное снятие спинового вырождения зон, а также киральные правила отбора при оптических переходах открывают широкие возможности управления спиновыми и долинными степенями свободы оптически.

В настоящее время активно исследуется спиновая и долинная ориентация носителей заряда и экситонов, динамика спиновых и долинных степеней свободы (см. [15] и ссылки приведенные там).

Особенно интересными оказываются эффекты, связанные с переносом спиновых и долинных степеней

свободы в таких системах, а именно, спиновый и долинные эффекты Холла [16-18]. Весьма специфической и привлекательной возможна ситуация, когда транспорт экситонов и электронов контролируется межчастичными столкновениями [19].

### Заключение

Несмотря на значительный прогресс в изучении экстремально-двумерных дихалькогенидов переходных металлов, их оптических и транспортных свойств, развитие этой области нанопизики далеко от завершения. Например, последние годы появились гетеробислои, где наблюдается эффект муара – несоизмеримости кристаллических решеток слоев. Такие системы демонстрируют ряд необычных эффектов, а фундаментальное понимание их физических свойств еще не достигнуто. В частности, остается нерешенным вопрос о причинах локализации носителей заряда в таких муаровых сверхрешетках.

Автор благодарен Т. Аману, В.В. Бельху, М.В. Дурневу, Л.Е. Голубу, Е.Л. Ивченко, Кс. Мари, М.А. Семиной, А. Черникову, Б. Урбажеку за ценные обсуждения и сотрудничество. Работа частично поддержана грантом РФФИ 20-52-16303.

### Литература

1. G. Wang, A. Chernikov, M. M. Glazov, *et al.* // *Rev. Mod. Phys.* V. 90, 021001 (2018).
2. М.В. Дурнев, М.М. Глазов // *УФН* т. 188, 913 (2018).
3. Н. С. Рыгова // *Вест. МГУ (сер. физ.)*, т. 3, 30 (1967); Л. В. Келдыш // *Письма в ЖЭТФ* т. 29, 716 (1979).
4. Alexey Chernikov, *et al.* // *Phys. Rev. Lett.*, V. 113, 076802 (2014).
5. N. V. Leppenen, L. E. Golub, and E. L. Ivchenko // *Phys. Rev. B* V. 102, 155305 (2020).
6. Kin Fai Mak, *et al.* // *Nat. Mater.* V. 12, 207 (2013).
7. E. Courtade, M. Semina, M. Manca, M. M. Glazov, *et al.* // *Phys. Rev. B* V. 96, 085302 (2017).
8. K. Wagner, E. Wietek, J. D. Ziegler, M, A. Semina, *et al.* // *Phys. Rev. Lett.* V. 125, 267401 (2020).
9. М.М. Glazov // *J. Chem. Phys.* V. 153, 034703 (2020).

10. H.H. Fang, B. Han, C. Robert, M.A. Semina, *et al.* // *Phys. Rev. Lett.* V. 123, 067401 (2019).
11. M. Kulig, *et al.* // *Phys. Rev. Lett.* V. 120, 207401 (2018).
12. M. A. Akmaev, M. M. Glazov, M. V. Kochiev, *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 119, 113102 (2021).
13. M.M. Glazov // *Phys. Rev. Lett.* V. 124, 166802 (2020).
14. K. Wagner, *et al.* // *Phys. Rev. Lett.* V. 127, 076801 (2021).
15. M.M. Глазов, Е.Л. Ивченко // *Письма в ЖЭТФ* т. 113, 10 (2021).
16. Masaru Onga, Yijin Zhang, Toshiya Ideue, Yoshihiro Iwasa // *Nat. Mater.* V. 16, 1193 (2017).
17. M. M. Glazov, L. E. Golub // *Phys. Rev. B* V. 102, 155302 (2020).
18. M. M. Glazov, L. E. Golub // *Phys. Rev. Lett.* 125, 157403 (2020).
19. M. M. Glazov // *2D Mater.* 9, 015027 (2022).

# Проводимость двумерной сверхрешетки на основе графена в сильных внешних электрических полях с учетом ионизации примеси

С.Ю. Глазов<sup>1,2\*</sup>, И.А. Подгорная<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный социально-педагогический университет, пр-кт им В.И. Ленина, д. 27, Волгоград, 400005.

<sup>2</sup> Волгоградский государственный медицинский университет, площадь Павших борцов, д. 1, г. Волгоград, 400131.

\*ser-glazov@yandex.ru

Исследована зависимость плотности тока в двумерной сверхрешетке на основе графена от характеристик и ориентации приложенных статического и переменного электрических полей с учетом ионизации примесных центров. Выявлены особенности управления проводимостью поперечными электрическими полями при учете ионизации примесей в зависимости от концентрации носителей.

## Введение

В последние годы изучению двумерных (2D) графеновых сверхрешеток (ГСР) посвящено большое количество работ: рассматриваются новые подходы к изготовлению ГСР [1-3], исследуется влияние внешних электрических полей на их транспортные свойства [3,5]. В предложенном исследовании используется методика, развитая для щелевого графена, позволяющая с достаточной точностью описывать проводимость графеновой сверхрешетки в широком диапазоне параметров с одновременным учетом ионизации примесных центров.

## Основные уравнения

Энергетический спектр электронов в 2D ГСР в одноминзонном приближении выбран в виде [3]

$$\varepsilon(\vec{p}) = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2(1 - \cos(p_x d_1)) + \Delta_3^2(1 - \cos(p_y d_2))}, \quad (1)$$

где  $\vec{p}$  – квазиимпульс электрона,  $d_i = a_i + b_i$  – период ГСР,  $a_i$  и  $b_i$  – ширины ячеек бесщелевого и щелевого графена, здесь и далее  $\hbar = 1$ .

Рассмотрим отклик графена на действие постоянного и переменного электрических полей.  $\vec{E} = (E_{1x} + E_{0x} \cos \omega t, E_{1y} + E_{0y} \cos \omega t)$  – напряженность электрического поля,  $E_i$  – модуль напряженности постоянного электрического поля,  $E_0$  и  $\omega$  – амплитуда и частота переменного электрического поля.

Плотность тока  $j_x$  текущего вдоль оси  $x$  определяется по формуле

$$j_x = -e \sum_{\vec{p}} v_x(\vec{p}) f(\vec{p}), \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $f(\vec{p})$  – неравновесная функция распределения носителей. Для нахождения функции распределения носителей использовано классическое уравнение Больцмана с модельным интегралом столкновений Батнагара-Гросса-Крука при учете темпа генерации и рекомбинации, позволяющее адекватно учесть ионизацию примесей. Будем считать электронный газ невырожденным.

После разложения скорости носителей в ряд Фурье по двум переменным  $p_x$  и  $p_y$ , и с учетом найденной неравновесной функции распределения, после усреднения по времени определяем постоянную составляющую плотности тока

$$j_x = j_0 B_{ion} \times \sum A_{nm} C_{nm} \sin \varphi_{knm} \cos \varphi_{knm} J_k^2(n\alpha_x + m\alpha_y) \quad (3)$$

где  $j_0 = -ed_1 n \Delta / 2$ ,  $n$  – концентрация электронов в зоне проводимости,  $N$  – концентрация примесей в графене,  $B_{ion} = 1 + (N/n_0) / (\tau_0 v_r / \exp(-2\sigma \text{Im} S) + 1)$ ,  $S$  – классическое действие, набираемое электроном при подбарьерном движении,  $\tau_0$  – время начала туннелирования,  $\sigma = \Delta/v$ ,  $\gamma = v/v_r$ ,  $v_r$  – частота рекомбинации,  $J_n(x)$  – функция Бесселя 1-го рода  $n$ -го порядка,  $v$  – частота столкновений,  $\Omega_x = eE_{1x} d_1$ ,  $\Omega_y = eE_{1y} d_2$ ,  $\sin \varphi_{knm}^{\pm} = v / \sqrt{v^2 + (m\Omega_x \pm n\Omega_y + k\omega)^2}$ ,  $\alpha_x = eE_{0x} d_1 / \omega$ ,  $\alpha_y = eE_{0y} d_2 / \omega$ ,  $A_{nm}$  и  $C_{nm}$  – коэффициенты, определяемые спектром (1), в силу громоздкости формул не приводим.

Для дальнейшего расчета выберем период ГСР  $d_1 = d_2$ .

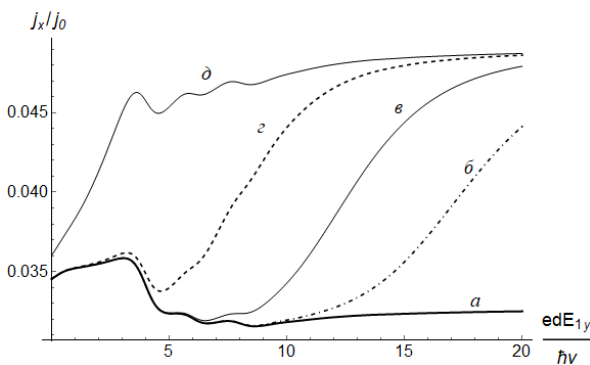
## Основные результаты

Ключевую роль в рассматриваемых в этой работе эффектах играют столкновения электронов с решеткой.

Зависимость плотности тока от амплитуды напряженности продольного электрического поля имеет максимум, определяемый характерной частотой релаксации и участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Ионизация примесных центров в квазиклассически сильных полях, учет которой проводился методом мнимого времени [4], приводит к росту концентрации носителей заряда в минизоне проводимости и соответственно, к увеличению плотности тока. Начало роста тока и длительность процесса установления насыщения ионизации определяются глубиной залегания примеси и ее концентрацией.

Как видно из формулы (3), на постоянную составляющую плотности тока, текущего вдоль оси  $x$ , оказывают влияние не только напряженность постоянного и амплитуда переменного электрических полей, ориентированных вдоль этой оси, но и параметры полей, ориентированных перпендикулярно. Это следствие неаддитивности энергетического спектра графена (полная энергия электронов графена не является суммой ее компонент по двум взаимно перпендикулярным направлениям).



**Рис. 1.** Зависимость плотности тока от напряженности постоянного электрического поля, приложенного вдоль оси  $Y$ , когда  $\Omega_x/\nu = 4$ ,  $\alpha_x = 3$ ,  $\alpha_y = 5$ ,  $\omega/\nu = 2.0$ : а) без учета ионизации примеси, и с учетом ионизации примеси б)  $\tilde{\nu} = 0.2f_1$ , в)  $\tilde{\nu} = 0.17f_1$ , д)  $\tilde{\nu} = 0.11f_1$

На рис. 1 показана возможность управления плотностью тока вдоль оси  $x$  поперечным постоянным электрическим полем. Резкое возрастание плотности тока ( $a-d$ ) определяется ионизацией примеси,

причем для более глубоких примесей начало роста сдвигается в сторону более сильных полей. Также выявлена возможность управления плотностью тока вдоль оси  $x$  поперечным переменным электрическим полем. Программный комплекс, созданный на основе анализа нашей компьютерной модели, при сравнении с экспериментальными значениями тока позволит создать детектор определения глубины залегания примеси или ее концентрации.

## Заключение

Получено аналитическое выражение для нахождения плотности тока в ГСР в условиях воздействия во взаимно перпендикулярных направлениях постоянных и переменных электрических полей.

Выявлен осцилляционный характер зависимости постоянной составляющей плотности тока от величины напряженности постоянного электрического поля, амплитуды и частоты переменного электрического поля.

Неаддитивность энергетического спектра графена приводит к взаимной зависимости движений носителей заряда вдоль перпендикулярных друг другу направлений.

Постоянная составляющая плотности тока, текущего вдоль оси  $x$ , зависит не только от напряженности постоянного электрического поля, направленного вдоль этой оси, но и от параметров полей ориентированных перпендикулярно.

## Литература

1. C. Forsythe et al // Nature Nanotechnology, V. 13, P. 566 (2018).
2. Y. Zhang, Y. Kim, M.J. Gilbert and N. Mason // NPJ 2D Materials and Applications, V. 2, P. 31 (2018).
3. S.V. Kryuchkov, C.A. Popov // Journal of Nano- and Electronic Physics, V. 9, № 2, P. 02013 (2017).
4. П.В. Бадикова, С.Ю. Глазов, Г.А. Сыродоев // ФТП, Т. 7, В. 53, С. 927 (2019).
5. П.В. Бадикова, С.Ю. Глазов, Г.А. Сыродоев // Изв. РАН. Сер. физ, Т. 84, № 1, С.38 (2020).



# Сравнительный анализ спектров поглощения нанокристаллов CdSe со структурой вюрцита и цинковой обманки

А.А. Головатенко<sup>1,\*</sup>, А.В. Родина<sup>1</sup>, Т. Aubert<sup>2,3</sup>, М. Samoli<sup>2</sup>, L. Lermusiaux<sup>4</sup>, Т. Zinn<sup>5</sup>, В. Abecassis<sup>4</sup>, Z. Hens<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> Department of Chemistry, Ghent University, Ghent, Belgium, 9000.

<sup>3</sup> ICGM, Univ Montpellier, CNRS, ENSCM, Montpellier, France, 34000.

<sup>4</sup> Univ. Lyon, ENS de Lyon, CNRS, Laboratoire de Chimie, Lyon, France, 69342.

<sup>5</sup> ESRF – The European Synchrotron, 38043 Grenoble, France.

\*sasha.pti@mail.ioffe.ru

Представлены результаты моделирования экспериментальных зависимостей энергии первого ( $E_1$ ) и второго ( $E_2$ ) пиков в спектрах оптического поглощения сферических нанокристаллов CdSe со структурой вюрцита (wz) и цинковой обманки (zb). Расчет энергий электрона и дырки производился в рамках усеченной восьмизонной кр-модели. В результате установлено, что большее значение разности  $E_2-E_1$  при одинаковой энергии первого пика поглощения  $E_1$  связано с меньшими массами электрона и дырки в zb-CdSe. Также произведен анализ влияния подмешивания спинорбитальной валентной зоны на расщепление тонкой энергетической структуры экситона за счет обменного взаимодействия электрона и дырки, кристаллического поля и анизотропии формы нанокристалла. Показано, что для основного состояния экситона, определяющего пик поглощения  $E_1$ , подмешивание спинорбитальной валентной зоны слабо влияет на тонкую энергетическую структуру.

Создание наноразмерных полупроводников структуры позволяет не только модифицировать оптическую запрещенную зону полупроводников материалов за счет квантования носителей заряда, но и открывает возможность контролировать кристаллическую структуру полупроводника. Например, тогда как объемные GaAs и InP имеют структуру цинковой обманки (zb), наностержни из этих материалов могут быть получены со структурой вюрцита (wz) [1]. Наоборот, объемный CdSe имеет вюрцитную структуру, но коллоидные нанокристаллы (НК) и нанопластины CdSe могут иметь как структуру вюрцита, так и цинковой обманки [2,3]. Ранее сообщалось, что помимо анализа методом рентгеновской дифракции, отличить wz- и zb-CdSe можно по разнице первого  $E_1$  и второго  $E_2$  пиков в спектрах поглощения при одинаковой энергии  $E_1$  [2,4]. Однако объяснения такого различия предложено до сих пор не было.

## Методика эксперимента

Образцы НК wz-CdSe и zb-CdSe различного размера были синтезированы в университете г. Гент. Для определения размера НК был применен метод малоуглового рентгеновского рассеяния. С использованием установленных размеров были построены зависимости энергии первого пика поглощения  $E_1$

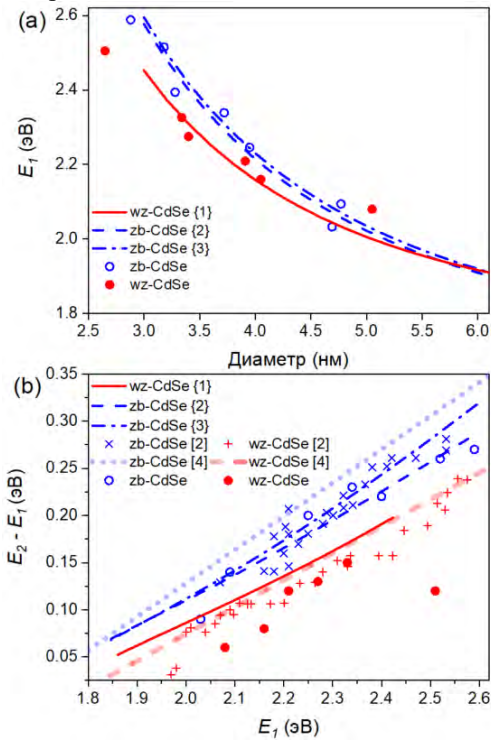
при комнатной температуре от диаметра нанокристалла (рис.1(a)). Также была построена зависимость разницы энергий  $E_2-E_1$  от энергии  $E_1$  (рис.1(b)). Можно видеть, что для zb-CdSe НК разница  $E_2-E_1$  оказывается больше, в согласии с ранее опубликованными результатами [2,4].

## Моделирование

Для описания наблюдаемых зависимостей мы используем метод расчета экситонных состояний, из работы [5]. Данный метод основан на использовании модели Кейна для расчета энергии электрона и шестизонной модели Латтинжера для расчета энергии дырки. Кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой учитывается по теории возмущений с использованием высокочастотной диэлектрической проницаемости в CdSe  $\epsilon_{\text{inf}} = 6.2$ . Расчет в рамках данного метода требует знания параметров зоны проводимости (энергия Кейна  $E_p$ , масса электрона) и валентной зоны (параметры Латтинжера  $\gamma$ ,  $\gamma_1$ ).

В результате расчета установлено, что одновременно описать зависимость энергии  $E_1$  от диаметра нанокристалла, зависимость разницы  $E_2-E_1$  от  $E_1$ , а также получить нижнее по энергии дипольно-разрешенное состояние экситона, возможно с параметрами из Таблицы 1. Из рисунка 1(a) можно

видеть, что при большем размере и меньшей величине запрещенной зоны, НК zb-CdSe



**Рис. 1.** Зависимость (а) энергии первого пика  $E_1$  в спектре поглощения от диаметра НК. (б) разницы энергий первого и второго пика в спектре поглощения  $E_2 - E_1$  от энергии первого пика. Кружки показывают экспериментальные результаты данной работы. В фигурных скобках указаны номера строк из таблицы 1. В прямых скобках указаны номера работ из списка литературы

**Таблица 1.** Параметры используемые при расчете:  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $E_p$  – энергия Кейна,  $m_e^*$  – эффективная масса электрона,  $\gamma_1, \gamma$  – параметры Латтинжера,  $m_{hh}^* = 1 / (\gamma_1 - 2\gamma)$  – эффективная масса тяжелой дырки

Материал	$E_g, \text{эВ}$	$E_p, \text{эВ}$	$m_e^*$	$\gamma_1, \gamma$	$m_{hh}^*$
wz-CdSe	1.751	17.5	0.136	1.67, 0.56[6]	1.82
zb-CdSe	1.675	17.5	0.117	2.52, 0.83[7]	1.16
zb-CdSe	1.675	17.5	0.110	2.04, 0.58[8]	1.13

имеют такую же энергию первого пика поглощения, что, согласно нашему анализу, связано с меньшими массами (большими энергиями размерного квантования) электрона и дырки в zb-CdSe. Первый пик поглощения соответствует экситону, образованному электроном в основном состоянии  $1S_e$  и дыркой на первом уровне s-симметрии  $1S_{3/2}$ . Ввиду того, что второй пик поглощения соответствует экситону, образованному также электроном в основном состоянии и дыркой на втором уровне s-симметрии  $2S_{3/2}$ , разница  $E_2 - E_1$  определяется разностью энергий дырки на уровнях  $2S_{3/2}$  и  $1S_{3/2}$ . Ввиду того, что масса дырки в zb-CdSe в полтора

раза меньше, чем в wz-CdSe, разница энергий  $E_2 - E_1$  оказывается больше в НК zb-CdSe.

Для описания пиков в спектре поглощения существенным является использование шестизонной модели Латтинжера. В то же время, для расчета тонкой энергетической структуры основного состояния экситона  $1S_e 1S_{3/2}$  обычно используется четырехзонная модель Латтинжера, не учитывающая подмешивания спинорбитальной валентной зоны. Мы получили аналитические выражения, описывающие влияние данного подмешивания на расщепление тонкой энергетической структуры экситона, вызванное обменным взаимодействием электрона и дырки, кристаллическим полем в wz-CdSe, а также анизотропией формы нанокристалла. Нами установлено, что в случае CdSe подмешивание спинорбитальной зоны приводит лишь к незначительному количественному изменению расщеплений тонкой структуры основного экситонного состояния. Однако данное подмешивание может быть важно в случае полупроводников с малой величиной спинорбитального расщепления, например InP или CuCl.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 20-42-01008.

### Литература

1. F. Glas, J.C. Harmand, G. Patriarche // Physical Review Letters, V. 99, 146101 (2007).
2. M. B. Mohamed, D. Tonti, A.V.L. Al-Salman *et al.* // J. Phys. Chem. B, V. 109, 10533-10537 (2005).
3. X. Gao, X. Zhang, L. Zhao *et al.* // Nano Letters, V. 18, 6665-6667, (2018).
4. F. Wu, Z. Zhang, Z. Zhu *et al.* // Cryst. Eng. Comm., V. 20, 4492-4498, (2018).
5. A.I. Ekimov, F. Hache, M.C. Schanneklein *et al.* // J. Opt. Soc. Am. B, V. 10, 100-107 (1993).
6. T. Richard, P. Lefebvre, H. Mathieu *et al.* // Physical Review B, V. 53, 7287-7298 (1996).
7. H. Fu, L.W. Wang, A. Zunger // Physical Review B, V. 57, 9971-9987 (1998).
8. D.J. Norris, M.G. Bawendi // Physical Review B, V. 53, 16338-16346 (1996).

# Создание центров окраски в CVD алмазе и управление их зарядовыми состояниями

А.М. Горбачев<sup>1,\*</sup>, А.Л. Вихарев<sup>1</sup>, М.А. Лобаев<sup>1</sup>, Д.Б. Радищев<sup>1</sup>, М.Н. Дроздов<sup>2</sup>,  
С.А. Богданов<sup>1</sup>, В.А. Исаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*gorb@appl.sci-nnov.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований легирования алмаза в процессе CVD роста азотом и кремнием для создания центров окраски NV и SiV. Проведено исследование влияния на зарядовые состояния центров окраски акцепторной и донорной примесей. Для этого было проведено совместное легирование алмаза примесью, создающей центры окраски, и фосфором или бором. Установлено, что таким способом возможно управление зарядовыми состояниями центров окраски.

## Введение

Центры окраски в алмазе представляют собой дефекты кристаллической решетки, как правило, в виде примесного атома и вакансии. Такой дефект может быть описан структурой энергетических уровней аналогичной уединенному атому. Поэтому такие центры находят широкое применение в различных квантовых технологиях: коммуникации, вычисления, измерения. Наиболее изученным центром является азот-вакансия (NV центр), в последнее время интенсивно изучаются центры кремний-вакансия (SiV) и германий-вакансия (GeV). Легирование алмаза осуществляется методом ионной имплантации и непосредственно в процессе роста алмаза из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition).

Метод CVD обладает рядом преимуществ по сравнению с ионной имплантацией. Основными являются отсутствие повреждений кристаллической решетки ионным пучком и возможность формирования локализованных с высокой (нанометровой) точностью легированных областей на различной глубине от поверхности кристалла. Большинство центров окраски могут существовать в разных зарядовых состояниях, каждое из которых имеет свои оптические и спиновые свойства. Зарядовые состояния зависят от наличия в алмазе, который является широкозонным полупроводником, донорной или акцепторной примесей. Поэтому исследование совместного легирования алмаза различными примесями, одна из которых создает центры окраски, а другая свободные носители заряда, является актуальной задачей.

## Исследование встраиваемости кремния в CVD алмаз

Зависимость встраиваемости азота, бора и фосфора в алмаз от режимов его CVD роста достаточно хорошо известна, в том числе из наших исследований [1–3]. В тоже время, встраиваемость кремния в алмаз при его CVD росте изучена недостаточно. Поэтому основное внимание было уделено подробному исследованию режимов легирования алмаза кремнием.

Исследование CVD роста монокристаллического алмаза в режиме легирования различными примесями проводилось на разработанном в ИПФ РАН реакторе для роста легированного алмаза [4]. Осаждения CVD алмаза осуществлялось на монокристаллические алмазные подложки с ориентацией поверхности (100). Для исследования концентрации примесей в легированных слоях применялся метод ВИМС (вторично-ионная масс-спектрометрия). Исследования флуоресценции центров окраски в CVD алмазе были проведены на созданной в ИПФ РАН установке микрорамановской спектроскопии и фотолюминесценции на основе спектрометра Horiba Jobin Yvon FHR-1000 с ПЗС матрицей и непрерывного DPSS лазера мощностью до 1 Вт на длине волны 514 нм.

В результате были получены экспериментальные зависимости встраиваемости кремния в CVD алмаз от всех основных параметров осаждения: от потока силана и метана, от температуры подложки, от давления смеси газов, от угла разориентации поверхности подложки.

## Влияние донорной и акцепторной примесей

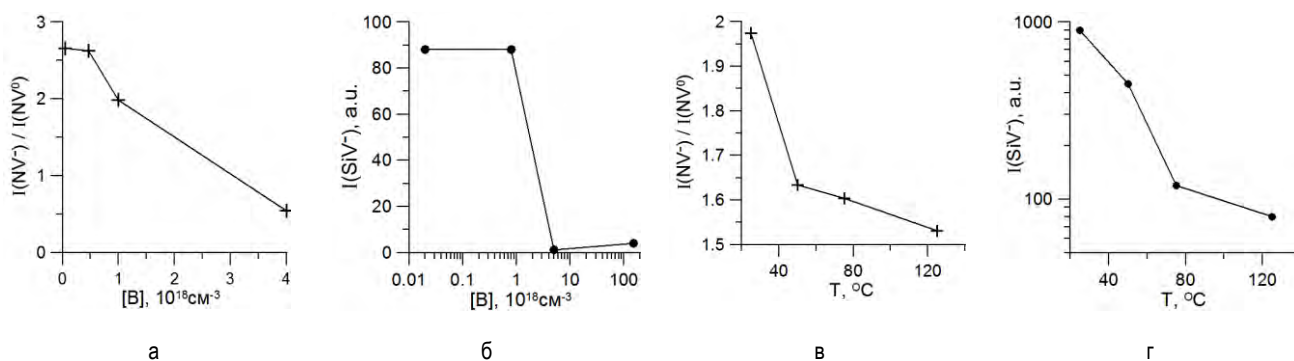
Влияние донорной примеси (фосфора) на характеристики фотолюминесценции NV центров было изучено нами в работе [5]. Было установлено, что наличие доноров позволяет не только обеспечить преимущественное существование NV центров в отрицательном зарядовом состоянии  $NV^-$ , но и стабилизировать  $NV^-$  состояние в условиях большой мощности возбуждающего лазера. Сильное легирование фосфором в сочетании с невысокой концентрацией азота дает возможность увеличить долю  $NV^-$  состояния без существенного ухудшения когерентных свойств  $NV^-$  центров.

При легировании азотом увеличение концентрации акцептора (бора) приводит к уменьшению отношения концентраций  $NV^-$  центров к концентрации центров в нейтральном состоянии  $NV^0$ , рис.1(а). Для образцов легированных кремнием рост концентрации акцептора приводит к резкому уменьшению интенсивности излучения  $SiV^-$  центра, рис.1(б). Бор в алмазе имеет высокий порог активации, и концентрация свободных носителей заряда

сильно зависит от температуры. Увеличение температуры оказывает на зарядовые состояния влияние аналогичное повышению концентрации акцепторной примеси, приводит к уменьшению доли центров в отрицательном зарядовом состоянии, рис.1(в,г). Для  $SiV^-$  центров в алмазе, легированном только кремнием и совместно с фосфором, уменьшение интенсивности с ростом температуры происходит по экспоненциальному закону, причем наличие фосфора практически не влияет на эту зависимость. Напротив, при совместном легировании бором интенсивность  $SiV^-$  центров с ростом температуры спадает гораздо быстрее.

## Заключение

В ходе проведенных исследований были определены режимы CVD роста, которые обеспечивают легирование алмаза комбинацией примесей. Установлено, что совместное легирование алмаза атомами, создающими центры окраски, и донорной или акцепторной примесью позволяет управлять зарядовыми состояниями центров окраски, что является привлекательным для ряда приложений.



**Рис. 1.** Интенсивности фотолюминесценции центров окраски при наличии акцепторной примеси: отношение интенсивностей бесфононных линий излучения  $NV^-$  и  $NV^0$  центров в зависимости от концентрации бора (а) и от температуры образца (в); нормированная на поверхностную концентрацию кремния (интеграл от концентрации по глубине) интенсивность излучения  $SiV^-$  центров в зависимости от концентрации бора (б) и от температуры образца (г)

## Благодарности

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

## Литература

1. M.A.Lobaev, A.M.Gorbachev, S.A.Bogdanov *et al.* // Phys. Status Solidi A 215, 1800205 (2018).

2. M.A.Lobaev, A.M.Gorbachev, A.L.Vikharev *et al.* // Thin Solid Films 653, 215–222 (2018).

3. M.A.Lobaev, D.B.Radishev, A.M.Gorbachev *et al.* // Phys. Status Solidi A 2019, 1900234 (2019).

4. A.L.Vikharev, A.M.Gorbachev, M.A.Lobaev *et al.* // Phys. Status Solidi RRL 10, 324–327 (2016).

5. D.B.Radishev, M.A.Lobaev, S.A.Bogdanov *et al.* // Journal of Luminescence 239, 118404 (2021).

# Нелинейное уширение экситонных резонансов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs

Б.Ф. Грибакин<sup>1,\*</sup>, Е.С. Храмцов<sup>1</sup>, А.С. Курдюбов<sup>1</sup>, А.В. Трифонов<sup>2,1</sup>, И.В. Игнатьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория Оптики Спинов, Санкт-Петербургский Государственный Университет, Ульяновская, д. 1, 198504, Санкт-Петербург, Россия.

<sup>2</sup> Experimentelle Physik 2, Technische Universitat Dortmund, Дортмунд, Германия.

\*bgribakin@gmail.com

Теоретически и экспериментально исследовано однородное (столкновительное) уширение экситонных резонансов в квантовых ямах (КЯ) GaAs/AlGaAs, возникающее вследствие взаимодействия светлых экситонов с резервуаром неизлучающих экситонов, а также со свободными носителями. Предсказываемая теорией сублинейная зависимость уширения качественно подтверждается в экспериментальном исследовании.

## Введение

Экситоны с большим волновым вектором в плоскости квантовой ямы (КЯ) не взаимодействуют со светом. В высококачественных структурах с небольшим количеством дефектов эти экситоны могут жить десятки наносекунд после формирования, в результате чего их двумерная плотность может превышать плотность излучающих экситонов на порядки [1]. По этой причине взаимодействие светлых экситонов с резервуаром может сильно влиять на их динамику в зависимости от экспериментальных условий.

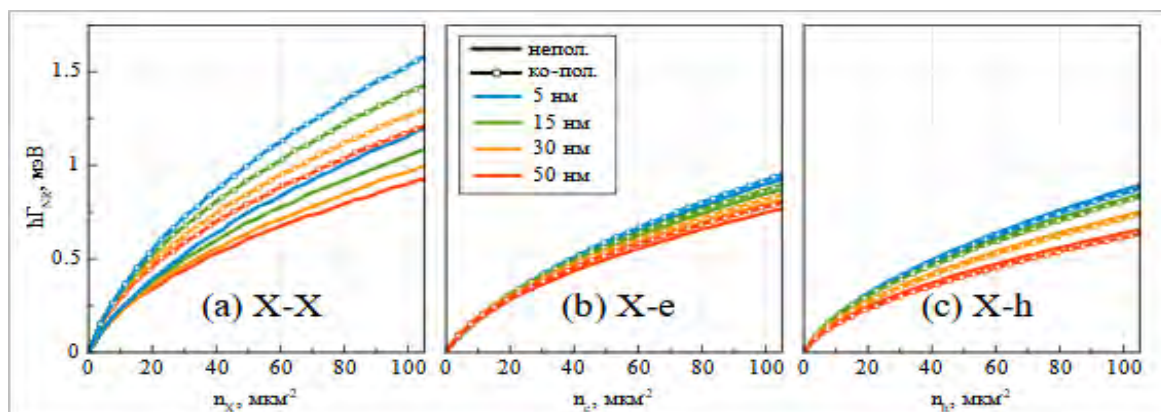
## Теоретическая часть

Расчеты показывают, что обменное взаимодействие является доминирующим вкладом в столкновительное уширение как при экситон-экситонном взаимодействии, так и при взаимодействии экситон-

носитель заряда. Расчеты также показывают, что уширение, вызванное данными взаимодействиями, зависит от степени спиновой поляризации ансамблей взаимодействующих частиц [2]. Результаты расчета уширения в GaAs/AlGaAs КЯ изображены на Рис. 1.

## Экспериментальная часть

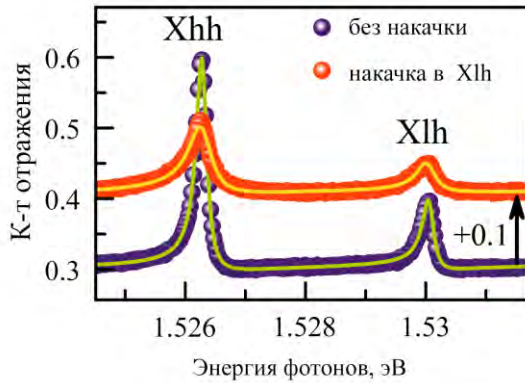
Исследована структура, выращенная методом молекулярно-пучковой эпитаксии на n-GaAs подложке с ориентацией (001), содержащая 14-нм GaAs КЯ, окруженную барьером AlGaAs с 3% содержанием алюминия. Основной метод исследования – спектроскопия отражения при использовании дополнительного луча накачки в резонанс легкого экситона с различной мощностью накачки. На Рис. 2 представлен пример спектра отражения исследованной структуры. Параметры экситонного резонанса, в частности, радиационное и нерадиационное ушире-



**Рис. 1.** Нелинейная зависимость уширения резонанса тяжелого экситона вследствие взаимодействия с другими экситонами (а), свободными электронами (б) и дырками (с). Сплошные линии: спиновые состояния равнонаселены, линии с кружками: населено только одно спиновое состояние (например,  $|+1\rangle$ ), а зондирующий луч ко-поляризован с накачкой



ние, извлекались из экспериментальных данных при помощи теории, описанной в книге Е. Л. Ивченко [3].



**Рис. 2.** Пример спектра отражения изученной структуры с 14-нм КЯ GaAs/AlGaAs без накачки (фиолетовые маркеры) и с накачкой в резонанс легкого экситона (красные маркеры). Линии, проходящие через точки — результат подгонки по теории, описанной в работе [3]

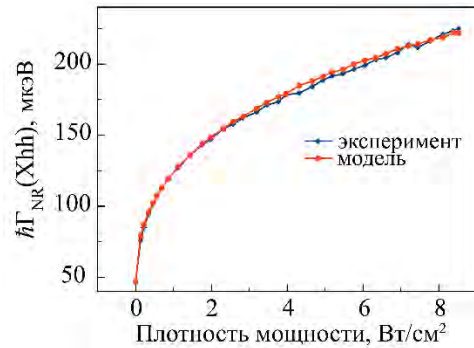
Результаты обработки зависимостей нерадиационного уширения от мощности непрерывной накачки изображены на Рис. 3. Для описания этих данных была построена феноменологическая модель, учитывающая основные процессы, влияющие на параметры экситонных резонансов. В модели учтены процессы создания легких экситонов накачкой со скоростью  $P_{Xlh}$ , их диссоциация на свободные носители ( $\gamma_{eh}$ ) и релаксация в тяжелые экситоны с большим волновым вектором ( $\gamma_{Xhh}$ ). Электрон-дырочные пары, в свою очередь, могут связываться также в тяжелые экситоны со скоростью  $\kappa_{ex}$ , которые живут неопределенно долго, пока в результате рассеяния не окажутся в световом конусе. Последний процесс характеризуется скоростью  $\kappa_{Xhh}$ . Таким образом, модель содержит четыре подгоночных параметра ( $P_{Xlh}$  определяется отдельно через коэффициент поглощения).

Модель описывается следующей системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dn_{Xlh}}{dt} = P_{Xlh} - (\gamma_{Xhh} + \gamma_{eh})n_{Xlh} \\ \frac{dn_e}{dt} = \frac{dn_h}{dt} = \gamma_{eh}n_{Xlh} - \kappa_{ex}n_en_h \\ \frac{dn_{Xhh}}{dt} = \gamma_{Xhh}n_{Xlh} + \kappa_{ex}n_en_h - \kappa_c n_{Xhh}(n_e + n_h) \end{cases}$$

Здесь  $n_{Xhh}$ ,  $n_{Xlh}$ ,  $n_e = n_h$  — двумерные плотности тяжелых и легких экситонов, а также

электронов и дырок в резервуаре. При непрерывной накачке производные равны нулю, и система решается аналитически. Предполагая, что нерадиационное уширение пропорционально числу частиц, и учитывая, что резервуар населен в основном тяжелыми экситонами, можем оценить уширение экситонного резонанса как  $\hbar\Gamma_{NR} \approx \hbar\Gamma_{NR(0)} \cdot \sigma n_{Xhh}$ . Результат применения данной модели к мощностной зависимости нерадиационного уширения тяжелого экситона представлен на Рис. 3. Как видно, данная модель находится в полном согласии с экспериментальной зависимостью.



**Рис. 3.** Результат применения предложенной феноменологической модели. Значение фонового нерадиационного уширения при отсутствии накачки  $\hbar\Gamma_{NR(0)} = 47$  мкэВ, итоговое значение сечения  $\sigma = 7$  мкм<sup>2</sup> · мкэВ

### Заключение

Измерена мощностная зависимость уширения резонанса тяжелого экситона при накачке в резонанс легкого экситона в 14-нм КЯ на основе GaAs. Предложена простая феноменологическая модель, количественно точно описывающая результаты. Предсказания более строгой теории находятся в согласии с экспериментом на качественном уровне.

### Литература

1. A.S. Kurdyubov et al. // Physical Review B, V. 104, 035414 (2021).
2. B.F. Gribakin et al. // Physical Review B, V. 104, 205302 (2021).
3. E.L. Ivchenko, Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures (Springer 2004).

# Метод связанных резонансов как эффективный метод расчета оптических спектров периодических наноструктур

Д.А. Громыко<sup>1, 2, \*</sup>, С.А. Дьяков<sup>1</sup>, С.Г. Тиходеев<sup>2, 3</sup>, Н.А. Гиппиус<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, д.30, стр.1, Москва, 121205.

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991.

<sup>3</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991.

\*Dmitrii.Gromyko@skoltech.ru

Разработан метод аппроксимации резонансной связи мод для расчета оптических спектров наноструктуры, состоящей из двух пластин фотонного кристалла. Метод основан на выводе входных и выходных резонансных векторов каждой пластины в формализме Фурье-модального метода в виде матрицы рассеяния. Мы показываем, что, используя резонансное приближение матриц рассеяния верхней и нижней пластин, можно построить полную матрицу рассеяния для комбинированной системы. Формирование резонансных выходных и входных векторов комбинированной системы выводится с помощью эффективного гамильтониана, отражающего связывание резонансных мод двух подсистем. Показано, что предложенная процедура резко сокращает время вычислений без существенной потери точности. Предложенная методика может стать мощным инструментом для быстрого решения обратных задач рассеяния с использованием методов стохастической оптимизации.

## Введение

Развитие методов изготовления наноструктур за последние три десятилетия привело к появлению многих теоретических инструментов для моделирования их оптических свойств. Большое разнообразие теоретических методов позволяет всесторонне изучать оптические резонансы всей системы и ее частей, выявляя вклад каждого структурного элемента в результирующий оптический отклик. При работе с фотонными структурами и устройствами мы всегда имеем дело с резонансными оптическими модами. Резонансные моды отвечают за особенности в оптических спектрах фотонных систем, эффективность взаимодействия фотонных систем с электромагнитным излучением напрямую связана с возможностью возбуждения резонансных мод. Изменения геометрии и состава структуры влияют на пространственную локализацию мод, спектральное положение и время жизни резонансов благодаря гибридизации мод друг с другом.

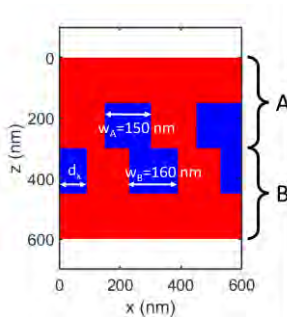
Современные методы изготовления наноструктур позволяют изменять самые различные параметры в широких диапазонах, так что задача подбора оптимальных параметров для усиления желаемого оптического эффекта зачастую оказывается крайне трудозатратной. С другой стороны, во многих практически важных случаях исследуемая фотонно-кристаллическая структура состоит из нескольких частей или подсистем, оптические свойства которых

уже известны. В связи с этим можно рассмотреть, например, комбинированную систему из двух пластин фотонного кристалла. Ранее было продемонстрировано, что можно определить резонансные частоты комбинированной системы, используя метод связанных резонансов в применении к оптическим модам отдельных частей заданной системы [1,2].

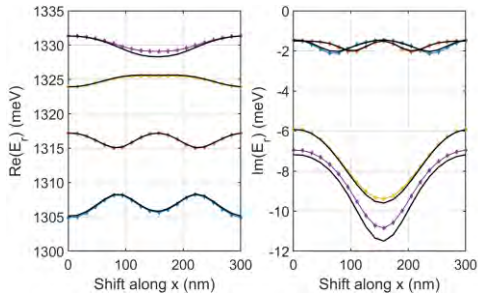
В настоящей работе мы представляем дальнейшее развитие метода связанных резонансов для расчета оптических спектров комбинированных фотонно-кристаллических систем. Мы показываем, что при известных резонансных энергиях мод верхнего и нижнего слоев фотонного кристалла и известных входных и выходных резонансных векторах, возможно построить резонансное приближение для матрицы рассеяния всей системы для любого заданного сдвига между подсистемами. При этом связывание резонансных мод описывается с помощью эффективного гамильтониана, что придает методу простую физическую интерпретацию. Также в работе дается численный пример использования метода связанных резонансов. Проводится сравнение спектров отражения комбинированной фотонно-кристаллической структуры, полученных стандартным Фурье-модальным методом [3] и методом связанных резонансов.

В исследовании достигается стократное ускорение вычислений по сравнению с непосредственным использованием Фурье-модального метода на персональном компьютере.

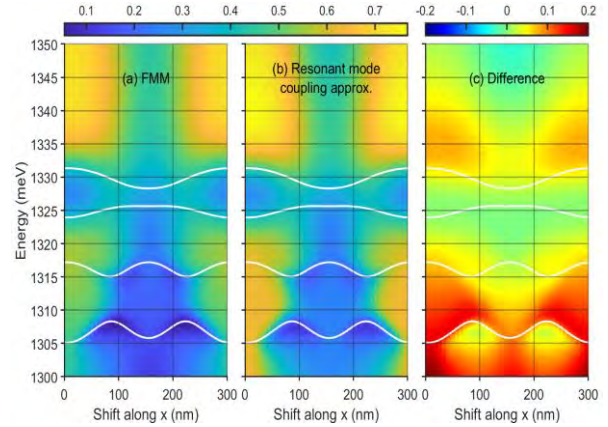
## Результаты



**Рис. 1.** Схематически изображенное поперечное сечение двух элементарных ячеек моделируемой структуры. Красным цветом обозначен кристаллический кремний, синим обозначен SiO<sub>2</sub>. Вся структура состоит из двух подсистем А и В, разделенных воздушной прослойкой пренебрежимо малой толщины. Каждая подсистема состоит из двух слоев (однородного и периодического) и трех интерфейсов (двух внешних интерфейсов с воздухом и одного внутреннего). Все слои имеют толщину 150 нм, ширины верхней и нижней периодических проволок SiO<sub>2</sub> равны 150 нм и 160 нм соответственно. Нижняя подсистема В может быть смещена относительно верхней системы А на расстояние, которое для данной конфигурации составляет 90 нм



**Рис. 2.** Панели (а,б): действительная и мнимая части энергий резонансов комбинированной структуры, рассчитанные с использованием стандартной процедуры поиска полюсов (точные положения, сплошная черная линия) и с использованием предложенного приближения метода связанных резонансов (цветные линии с ромбами).



**Рис. 3.** Спектры отражения плоских волн, падающих вдоль оси z и поляризованных вдоль оси y, в зависимости от латерального смещения структуры В вдоль оси x, рассчитанные с использованием (а) Фурье-модального метода (б) метода связанных резонансов. На панели (с) представлена разница между результатами с панелей (а) и (б). Спектральные положения резонансов комбинированной структуры показаны белыми линиями

## Литература

1. N. A. Gippius et al., Resonant mode coupling of optical resonances in stacked nanostructures, *Opt. Express* 18, 7569 (2010).
2. T. Weiss et al., Strong resonant mode coupling of Fabry-Perot and grating resonances in stacked two-layer systems, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 9, 390 (2011).
3. S. G. Tikhodeev et al., Quasiguidded modes and optical properties of photonic crystal slabs, *Phys. Rev. B* 66, 045102 (2002).

# Исследование особенностей полевой эмиссии в полупроводниковом диоде с наноразмерным вакуумным каналом проводимости на базе структур «кремний на изоляторе»

Т.А. Грязнева\*, Г.Д. Демин, Н.А. Дюжев

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498.

\* gryazneva@ckp-miet.ru

В работе представлена технология создания полупроводникового диода с наноразмерным вакуумным каналом проводимости на базе структур «кремний на изоляторе» (КНИ). Приведены результаты моделирования рабочих параметров исследуемых диодов с применением конкретных теоретических моделей, согласующихся с экспериментом.

## Введение

На сегодняшний день практически все современные устройства построены на основе кремниевой КМОП технологии. Однако при масштабировании транзисторов до размеров 100 нм и ниже возникает ряд проблем, связанных с влиянием разогрева, возникающих квантово-механических эффектов и паразитными утечками [1]. Одним из вариантов их решения является объединение преимуществ КМОП технологии с достижениями вакуумной нанoeлектроники. Полупроводниковые устройства с вакуумным каналом проводимости, длина которого не превышает длину свободного пробега электронов в воздухе (~200 нм) обладают рядом важных преимуществ по сравнению с их твердотельными аналогами - более устойчивы к радиации, обладают отличным быстродействием (в ТГц диапазоне частот), а также отличаются более простой технологией изготовления. Более того, вольт-амперные характеристики (ВАХ) таких приборов имеют экспоненциально высокую крутизну и стабильны в широком диапазоне рабочих температур.

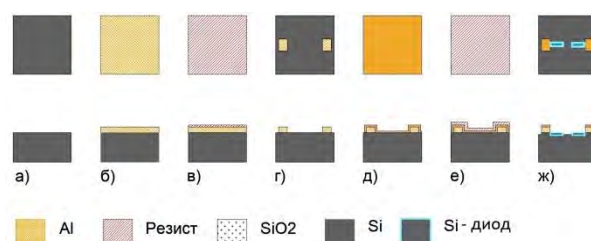
В настоящей работе в качестве материала подложки полупроводникового диода с наноразмерным вакуумным каналом проводимости были выбраны структуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ). Использование структур КНИ позволяет значительно уменьшить паразитные связи между элементами интегральных схем (ИС) и подложкой, а также увеличить устойчивость ИС к воздействиям дестабилизирующих факторов. Верхний предел диапазона рабочих температур ИС на основе КНИ существенно

выше, чем аналогичный предел ИС на основе монокристаллического кремния. Это объясняется тем, что диэлектрическая изоляция более термостойчива, чем изоляция p-n переходами. Радиационная стойкость ИС на основе КНИ также существенно выше [2].

## Технология создания

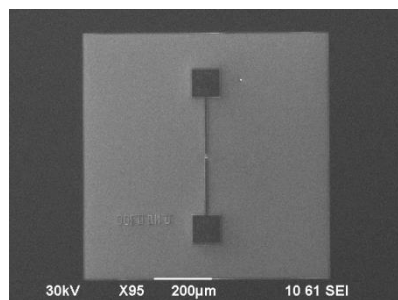
Схема технологического маршрута полупроводникового диода с наноразмерным вакуумным каналом проводимости на базе структур КНИ представлена на рисунке 1.

На предварительно подготовленные КНИ пластины нанесен толстый слой Al (800 нм). Далее методом центрифугирования на пластины нанесен резист, который после операции отжига переведен в стеклообразное состояние.



**Рис. 1.** Схема технологического маршрута создания полупроводникового диода с наноразмерным вакуумным каналом проводимости на базе структур КНИ: а) подготовленная пластина КНИ; б) нанесение Al (800 нм); в) 1 электронно-лучевая литография; г) контактные площадки; д) нанесение дополнительного слоя Al (50 нм); е) 2 электронно-лучевая литография; ж) конечные диодные структуры

Далее осуществлялось экспонирование резиста электронным лучом. Электронно-лучевая литография производилась в два этапа. На первом этапе были сформированы контактные площадки. После на пластину был нанесен дополнительный тонкий слой Al (50 нм), выступающий в качестве маски для травления кремния. На втором этапе электронно-лучевой литографии были изготовлены конечные диодные структуры, снимок которых представлен на рисунке 2.



**Рис. 2.** РЭМ-изображение полупроводникового диода с наноразмерным вакуумным каналом проводимости на базе структур КНИ

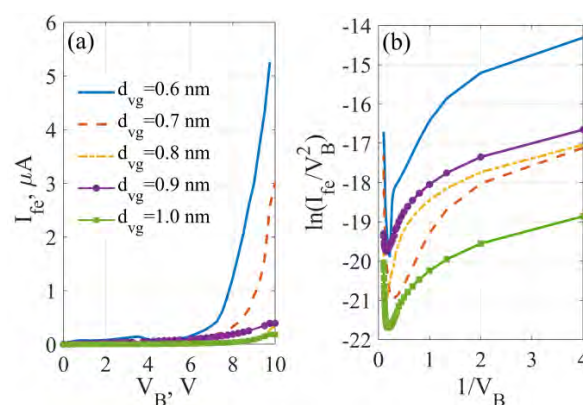
### Теория: первопринципная модель полевой эмиссии

Для описания полевой эмиссии в полупроводниковом диоде с наноразмерным вакуумным каналом на базе структур КНИ были проведены первопринципные расчеты на примере баллистического пролета электронов через вакуумный зазор длиной менее 10 нм с применением теории возмущений функционала плотности (DFPT) и неравновесных функций Грина (NEGF), отвечающих за квантовый транспорт электронов в электрических контактах. Для расчёта полевой эмиссии с кремниевого наномиттера в рамках DFPT был выбран набор базисных волновых функций в форме линейной комбинации атомных орбиталей (ЛКАО), а транспорт через вакуумный зазор рассчитывался на основе уравнения Кона-Шэма для описания рассеяния электронов в области электродов. Стоит отметить, что при увеличении ширины вакуумного зазора за пределы ~1 нм и переходе к туннельному режиму коэффициент прохождения в первопринципных расчетах с базисом ЛКАО стремится к нулю, что ограничивает применимость данного подхода.

### Результаты

На основе формализма Ландауэра [3] в программном пакете Quantum Espresso [4] были рассчитаны зависимости тока эмиссии от напряжения, пред-

ставленные на рисунке 3а, где изменение напряжения характеризуется как изменение электрохимического потенциала электродов на соответствующую величину. Ненулевые значения тока для зазора 0.6 нм объясняются частичным переходом к контактному режиму в рамках базисных функций, а именно вкладом 2Р орбиталей ближайших к поверхности атомов наномиттера и коллектора. Для наглядного представления области отсечки и линейной области автоэмиссии ВАХ на рисунке 3б приведены в координатах Фаулера-Нордгейма.



**Рис. 3.** ВАХ кремниевой диодной структуры с вакуумным зазором (ширина зазора - от 0.6 до 1 нм): (а) в обычных координатах и (б) в координатах Фаулера-Нордгейма

### Благодарности

Данная работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» (МИЭТ) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017, мнемокод FSMR-2020-0017).

### Литература

1. J. Shalf // *Phil. Trans. R. Soc. A*, V. 378, 20190061 (2020).
2. Б.Ю. Богданович, В.И. Графутин, В.И. Калугин и др. // *Технологии и методы исследования структур КНИ. Монография.* – М.: МИЭТ. 2003.
3. M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, S. Pinhas // *Phys. Rev. B*, V. 31, № 10, 6207 (1985).
4. P. Gianozzi, O. Basseggio, P. Bonfa *et al.* // *J. Chem. Phys.*, V. 152, 154105 (2020).



# Спин-орбитальное расщепление Рашбы в магнитном поле в квантовых ямах CdHgTe с нормальной и инвертированной зонной структурой

С.В. Гудина<sup>1,\*</sup>, В.Н. Неверов<sup>1</sup>, М.Р. Попов<sup>1</sup>, С.М. Подгорных<sup>1</sup>, Н.Г. Шелушина<sup>1</sup>, М.В. Якунин<sup>1</sup>, С.А. Дворецкий<sup>2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

\*svpopova@imp.uran.ru

С целью определения спинового расщепления Рашбы и его магнитолевой зависимости проведен анализ биений осцилляций Шубникова-де-Гааза в гетеросистемах HgCdTe/CdHgTe с близкой шириной квантовой ямы, полученных при вариации Cd как в квантовой яме, так и в барьерах и имеющих нормальную и инвертированную зонную структуру. Большие расщепления Рашбы в нулевом магнитном поле, найденные для структур с разными типами зонных спектров, практически одинаковы из-за значительной доли волновых функций р-типа как в подзоне E1 для образца с нормальным порядком зон, так и в подзоне H1 для образца с инвертированным расположением зон.

Снятие спинового вырождения в отсутствии магнитного поля (эффект Рашбы [1]) является темой постоянного интереса при исследовании гетероструктур на основе узкощелевых и бесщелевых полупроводников. Для возможных применений в спинтронике эффект Рашбы был исследован в квантовых ямах II-VI HgTe, в которых типичные значения энергии расщепления Рашбы, составляют от 17 мэВ [2] до 30 мэВ [3,4], что заметно больше, чем для узкощелевых систем III-V (3-5 мэВ).

В дополнение к малой энергетической щели в квантовых ямах HgTe, еще одним важным фактором, способствующим большой величине спин-орбитальной связи Рашбы, является инвертированный тип зонной структуры КЯ HgTe с шириной слоя больше 6 нм, когда край зоны проводимости формируется р-состояниями зоны Г<sub>8</sub>, а не s-состояниями зоны Г<sub>6</sub>, как в традиционных гетеросистемах.

Переход от инвертированного типа зонной структуры к нормальному происходит также при изменении содержания Cd в твердом растворе Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te при x>0.16, что дает дополнительный способ управления параметрами энергетического спектра.

Для определения параметров спин-орбитального расщепления Рашбы квантовых ямах наиболее интенсивно применяется исследование области квантовых магнитных полей для обнаружения и анализа биений осцилляций Шубникова-де Гааза (ШдГ).

## Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследованы образцы с квантовыми ямами Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te (x=0.15; 0.05) близкой шириной 13 и 15 нм, асимметрично легированные в барьере, концентрация электронов n ≈ (2.2 и 4.3)·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>. Согласно расчету зонной структуры [6] E(k<sub>x</sub>, k<sub>y</sub>) в нулевом поле в рамках 8-зонной модели Кейна один из асимметрично легированных образцов (15 нм) имеет инвертированную зонную структуру, а в другом (13 нм) обнаружен нормальный порядок зон, но в последнем электронная подзона по-прежнему содержит значительную долю волновых функций р-типа. Анализ осцилляций Шубникова-де-Гааза позволил получить как значения спин-орбитального расщепления на уровне Ферми в нулевом магнитном поле, которые достигают ~ 30 мэВ и не зависят от типа зонной структуры, так и зависимость полного спинового расщепления от магнитного поля δ(B). Последняя была описана выражением [7]

$$\delta(B) = [(\hbar\omega_c - g\mu_B B)^2 + \Delta_R^2]^{1/2} - \hbar\omega_c \cong \begin{cases} \Delta_R - \hbar\omega_c, & \text{if } \hbar\omega_c \ll \frac{\Delta_R}{1 - \frac{gm^*}{2m_0}} \\ \frac{gm^*}{2m_0} \hbar\omega_c, & \text{if } \hbar\omega_c \gg \frac{\Delta_R}{1 - \frac{gm^*}{2m_0}} \end{cases},$$

что дает возможность уточнить значения эффективной массы носителей заряда, поскольку в пределе слабых магнитных полей спиновое расщепление

$\delta(B)$  линейно уменьшается с  $\hbar\omega_c$ , причём скорость этого спада определяется эффективной массой носителей заряда, и  $g$ -фактор электронов, который можно получить из области сильных магнитных полей, где спин-орбитально связанные состояния оказываются сильно разделёнными по энергии, и спиновое расщепление  $\delta$  определяется зеемановским. Получены следующие значения параметров  $m^* = 0.039m_0$  ( $|g| = 35$  (15 нм)) и  $m^* = 0.024m_0$ , ( $|g| = 30$ , (13 нм)).

Значение спин-орбитального расщепления Рашбы столь велико благодаря сочетанию сильной структурной асимметрии квантовых ям, высокой концентрации электронов и большой доли состояний  $r$ -типа в нижней подзоне зоны проводимости.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

## Литература

1. Y. A. Bychkov and E. I. Rashba // *J. Phys. C*, V. 17, 6039 (1984).
2. X. C. Zhang, A. Pfeuffer-Jeschke, K. Ortner, *et al.* // *Phys. Rev. B*, V. 63, 245305 (2001).
3. Y. S. Gui, C. R. Becker, N. Dai, *et al.* // *Phys. Rev. B*, V. 70, 115328 (2004).
4. К. Э. Спири́н, А.В. Иконников, А.А. Ластовкин *и др.*, Письма в ЖЭТФ // Т. 92, 65 (2010).
5. Kuang Hong Gao, *et al.* // *EPL*, V. 124, 27006 (2018).
6. Л.С. Бовкун и др. // *ФТП*, Т. 52, 1274 (2018).
7. B. Das, *et al.* // *Phys.Rev.B*, V. 41, 8278 (1990).

# Al-содержащие и Al-free гетероструктуры для полупроводниковых лазерных излучателей спектрального диапазона 760–980 нм: сравнение и анализ

Н.В. Гультиков\*, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», ул. Введенского, 3, корп. 1, Москва, 117342.

\*nikita.gultikov@yandex.ru

В настоящей работе представлены результаты сравнения Al-содержащих и Al-free гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs, предназначенные для лазерных излучателей, работающих в широком спектральном диапазоне (760 – 980 нм). Фотolumинесцентный анализ и численные расчеты тепловой мощности, выделяемой вследствие безызлучательной рекомбинации на гетерограницах и свободной поверхности гетероструктуры, и теплового сопротивления в лазерных диодах являлись основными данными для сравнения эффективности гетероструктур того или иного спектрального диапазона. В работе также приводится сравнение технологических особенностей получения исследуемых ГС методом МОС-гидридной эпитаксии, которые могут существенно влиять на выходные характеристики создаваемых лазеров.

## Введение

Увеличение выходной оптической мощности и КПД полупроводниковых лазерных излучателей несомненно является актуальной задачей. Выбор системы материалов на основе соединений  $A_3B_5$  для создания полупроводникового лазера того или иного спектрального диапазона является важным шагом при проектировании лазерной гетероструктуры (ГС), так как это определяет не только технологические аспекты ее создания, но и такие физические процессы как, например, транспорт носителей зарядов в объемных и квантоворазмерных слоях ГС, излучательные и безызлучательные механизмы рекомбинации, выделение и перенос паразитной тепловой мощности в ГС.

В настоящей работе представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований Al-содержащих и Al-free гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, для лазерных излучателей, работающих в спектральном диапазоне от 760 до 980 нм.

## Экспериментальные образцы

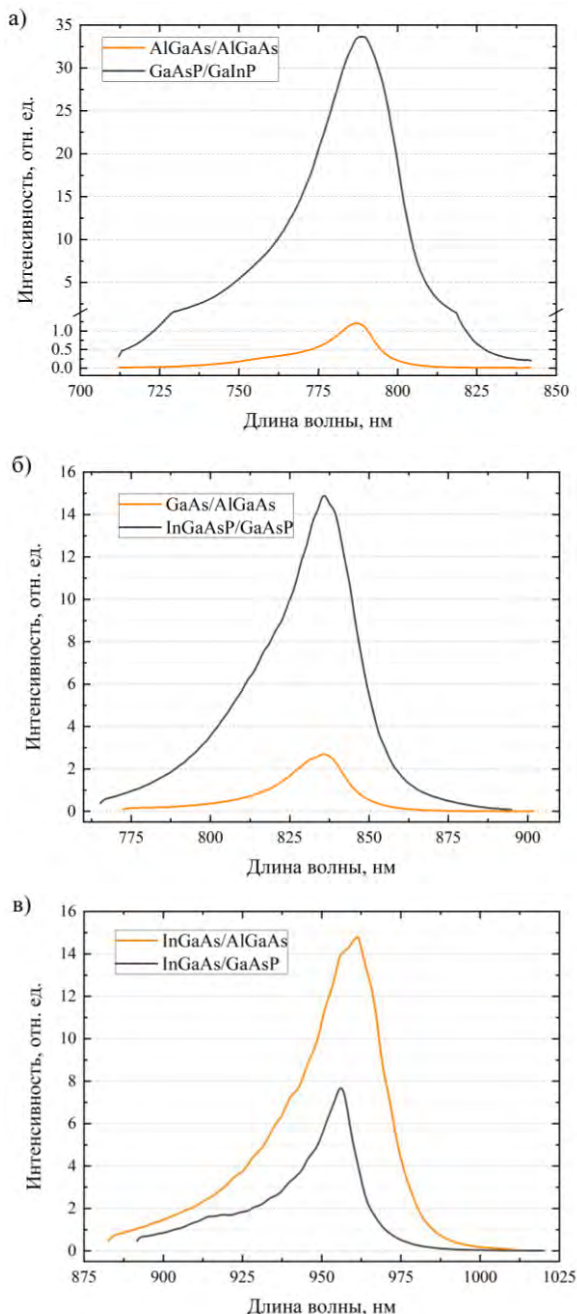
Были исследованы полупроводниковые ГС с одной квантовой ямой (AlGaAs и GaAsP для длины волны 785 нм, GaAs и InGaAsP для длины волны 835 нм, InGaAs для длины волны 955 нм,) окруженной Al-содержащими и Al-free барьерными слоями (AlGaAs и GaInP). Указанные ГС были сформированы методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном

давлении на подложках GaAs. В качестве исходных реагентов элементов III группы периодической системы использовались TMAI, TMGa и TMIIn, а в качестве источников элементов V группы -  $PH_3$  и  $AsH_3$ . Рост ГС проводился в среде высокочистого водорода. В процессе изготовления образцов ГС проводилась оптимизация технологических режимов (температура и скорость роста, отношение V/III) для достижения максимальных значений интенсивности фотolumинесценции. Согласование барьерного слоя GaInP с подложкой GaAs контролировалось при помощи рентгеновской дифрактометрии.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены спектры фотolumинесценции (ФЛ) Al-содержащих и Al-free ГС спектрального диапазона 760 – 950 нм, измеренные при комнатной температуре. Центральные длины волн ФЛ составляли 785 нм (рис. 1а), 835 нм (рис. 1б) и 955 нм (рис. 1в). Для накачки использовался лазер, излучающий на длине волны равной 532 нм. При сравнении экспериментальных данных обнаружено, что более высокую интенсивность ФЛ имеют Al-free ГС с центральными длинами ФЛ 785 нм и 835 нм, которая для 785 нм отличается более чем на порядок, а для 835 нм – в 5 раз. Различие в скоростях рекомбинации на гетерограницах и свободной поверхности ГС может являться основной причиной данных различий [1]. Дополнительной причиной может служить высокое сродство атомов Al к кислороду, что приво-

дит к росту центров безызлучательной рекомбинации в процессе роста Al-содержащих ГС и в конечном итоге к уменьшению интенсивности ФЛ [2, 3]. Однако для центральной длины волны ФЛ 955 нм интенсивность ФЛ больше у Al-содержащих ГС примерно в 2 раза, что, скорее всего, связано с технологическими особенностями получения квантовых ям InGaAs.



**Рис. 1** Спектры ФЛ Al-содержащих и Al-free ГС, выращенных на подложке GaAs, с центральной длиной волны ФЛ: а) 785 нм, б) 835 нм, в) 955 нм

Для оценки тепловой мощности, выделяемой вследствие безызлучательной рекомбинации на гетеро-

границах и свободной поверхности ГС, были выполнены численные расчёты для лазерных диодов (ЛД), работающих в непрерывном режиме накачки по ранее отработанной методике [4]. Ток накачки варьировался от 2 до 15 А. Расчетные значения для ЛД на 955 нм одинаковы для обеих систем материалов, в то время как для коротких длин волн они отличаются примерно в 2 раза в пользу Al-free системы.

В работе представлены результаты расчетов тепловых сопротивлений для ЛД. Несмотря на то, что тепловое сопротивление Al-free ГС больше в 1.5 – 2 раза по сравнению с AlGaAs/GaAs системой, Al-free ГС оказывается выгодной для спектральных диапазонов 760 – 790 нм и 830 – 850 нм [5]. Для длины волны 955 нм сохраняются примерно такие же соотношения тепловых сопротивлений, но благодаря тому, что обе системы материалов имеют квантовую яму InGaAs, Al-содержащая ГС имеет небольшое преимущество.

## Литература

1. Pearton S. J., Ren F., Hobson W. S., Abernathy C. R., Chakrabarti U. K. Comparison of surface recombination velocities in InGaP and AlGaAs mesa diodes // *J. Vacuum Science & Technology B*. 1994. V.12. P. 142–146.
2. Chand N., Chu S.N.G., Dutta N.K., Lopata J., Geva M., Syrbu A.V., Mereutza A.Z., Yakovlev V.P. Growth and fabrication of high-performance 980-nm strained InGaAs quantum-well lasers for erbium-doped fiber amplifiers // *IEEE J. Quantum Electronics*. 1994. V. 30. N 2. P. 424–439.
3. Ladugin M.A., Andreev A.Y., Yarotskaya I.V., Ryaboshtan Y.L., Bagaev T.A., Padalitsa A.A., Marmalyuk A.A., Vasil'ev M.G. Comparative study of GaAs/GaInP and GaAs/AlGaAs quantum wells grown by metalorganic vapor phase epitaxy // *Inorganic Materials*. 2019. T. 55. N 4. P. 315–319.
4. Ladugin M.A., Gul'tikov N.V., Marmalyuk A.A., Konyaev V.P., Solov'eva A.V. Continuous-wave laser diodes based on epitaxially integrated InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures // *Quantum Electronics*. 2019. V. 49. N 10. P. 905–908.
5. Гультиков Н.В., Мармалюк А.А., Ладугин М.А. Сравнение излучательных и тепловых характеристик лазерных излучателей на основе AlGaAs/GaAs и GaAsP/GaInP гетероструктур спектрального диапазона 750 – 850 нм // *Материалы XXV международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника»* (Нижний Новгород, 9–12 марта 2021).

# Гетероструктуры InGaAlAs/InAlAs для электрооптического модулятора, полученные методом цифровой эпитаксии

Д.В. Гуляев\*, Д.В. Дмитриев, Е.А. Колосовский, Л.С. Брагинский, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*gulyaev@isp.nsc.ru

Исследованы гетероструктуры с InGaAlAs/InAlAs множественными квантовыми ямами (МКЯ), предназначенные для создания электро-оптического модулятора. Измерена и рассчитана величина электрооптического эффекта гетероструктурах различного состава и толщины слоя. Установлено, что изменение показателя преломления InGaAlAs/InAlAs МКЯ может достигать  $10^{-3}$  при изменении напряжения 1 В на длине волны 1,55 мкм.

## Введение

В данной работе изучены свойства гетероэпитаксиальных структур с InAlGaAs/InAlAs множественными квантовыми ямами (МКЯ) на подложке InP для новой версии электрооптического модулятора Маха-Цендера на основе квантово-размерного эффекта Штарка. Данные InGaAlAs/InAlAs гетероструктуры интересны тем, что представляют собой двойной гребенчатый волновод. Это позволяет простым сужением волновода выдавить нулевую моду световой волны в нижележащий  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  слой, что приводит к уширению светового пучка и, следовательно может существенно упростить стыковку модулятора с оптоволоком [1].

## Методика

Исследуемые гетероструктуры выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке InP ориентации (100). Для получения InGaAlAs слоев четверного раствора использовался метод цифровой эпитаксии. Для определения показателя преломления слоев используемых в ГЭС для ЭОМ выращены однослойные InAlAs и InGaAs структуры с различным n и p уровнем легирования, а также InGaAlAs слои различного состава. Показатель преломления слоев однослойных структур (как мнимая, так и действительная части) на рабочей длине модулятора был определен из спектральной зависимости эллипсометрических параметров  $\psi$  и  $\Delta$  в диапазоне от 0.8 до 1.7 мкм при трех углах падения света 60, 65 и 70 градусов. Для исследования величины электро-оптического эффекта изготовлены тестовые pin образцы, содержащие множественные InGaAlAs/InAlAs квантовые ямы различного состава и толщины слоев (11-20 нм).

## Результаты

Отработаны условия роста четырехкомпонентного твердого раствора InGaAlAs с кристаллической решеткой согласованной с (001) InP подложкой, и определены оптимальные условия роста для каждого слоя ГЭС. В результате были получены гетероструктуры с InAlGaAs/InAlAs МКЯ с концентрацией дефектов на поверхности не более 500 на  $\text{см}^2$ , что достаточно для создания на их основе электрооптических модуляторов.

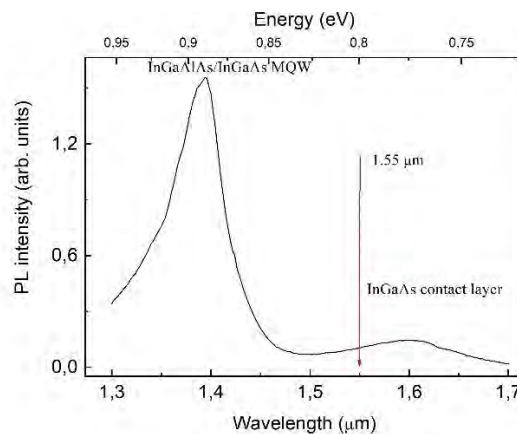


Рис. 1. Типичный спектр ФЛ ГЭС с МКЯ

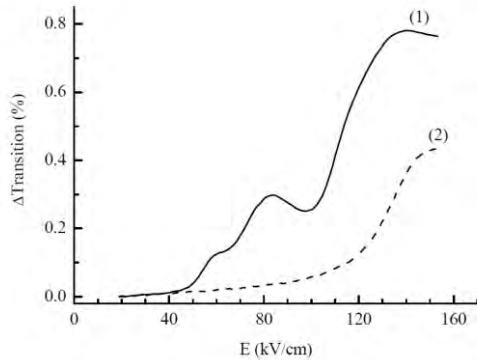
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.37}\text{Al}_{0.9}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  МКЯ.  $T=300$  К

На рисунке 1 показан спектр фотолуминесценции (ФЛ) гетероструктуры с множественными квантовыми ямами (МКЯ). Как видно из рисунка, пик ФЛ от исследованных МКЯ расположен вблизи 1.4 мкм, т.е. на 100 мэВ отстоит рабочей длины волны модулятора, что гарантирует низкое поглощение световой волны, распространяющейся в этом слое.

.На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента прохождения ГЭС с МКЯ от напряженности



электрического поля при  $T=300$  К. Как можно увидеть из рисунка электро-оптический-эффект в более широких КЯ выше.



**Рис. 2.** Типичное относительное изменение  $\kappa/\tau$  прохождения InGaAlAs/InAlAs МКЯ в электрическом поле. Толщина КЯ (2) 11 и (1) 15 нм

Для моделирования поведения коэффициента отражения многослойной гетероструктуры в электрическом поле был проведен расчет зависимостей коэффициента поглощения и показателя преломления. Задача определения значения коэффициента поглощения для структуры с квантовыми барьерами в электрическом поле сводилась к определению огибающих и расчета поглощения по формуле:

$$\sigma = \frac{(2\pi\hbar)^2 e^2}{m_e^2 c \omega n S} \sum_{p,q} \left| \left\langle f \left| \frac{\partial}{\partial z} \right| i \right\rangle \right|^2 \delta(\varepsilon_v - \varepsilon_c - \hbar\omega)$$

При этом, эффект кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой в квантовой яме учитывался введением фактора  $\Phi(\gamma) = \pi\gamma \exp(\pi\gamma) / \sinh(\pi\gamma)$ ,

где  $\gamma = (qa_R / \hbar)^{-1}$ , а  $q$  - z компонента импульса электрона. В отличие от [2] такой подход не позволяет учитывать экситонные эффекты, но существенно облегчает моделирование. Учет смешивания легкой и тяжелой дырок на границе проводился в приближении огибающей волновой функции.

Реальная часть показателя преломления была определена из спектральной зависимости  $\kappa/\tau$  поглощения по соотношения Крамерса-Кронинга связывающего реальную и мнимую часть комплексного числа. Величина электрооптического эффекта, составила для напряжения в 2-3 Вольт порядка  $\Delta n \sim 10^{-3}$  в исследованных ГЭС. В результате, как можно оценить по формуле  $L = \lambda / 2\Delta n$  длина интерферометра Маха-Цендера не превысит 1 мм при такой величине электро-оптического эффекта.

Методом эллипсометрии для всех слоев ГЭС, различающихся составом и уровнем легирования установлены вещественная и мнимая часть коэффициента преломления. Проведено сравнение полученных данных с данными моделирования и выбрана оптимальная конструкция структуры характеризующаяся минимальными оптическими потерями при максимальном электрооптическом эффекте.

## Литература

1. А.В. Царев, Р.М. Тазиев // Квант. электроника, т. 49, 266 (2019).
2. E.T. Kunkel et al // IEEE journal of quantum electronics, v. 43, 641 (2007).

# Исследование трибоэлектрических зарядов в тонких диэлектрических и полупроводниковых пленках методами СЗМ

Е.В. Гущина<sup>1,\*</sup>, М.С. Дунаевский<sup>1</sup>, Д.А. Малых<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

\* katgushch@yandex.ru

Выполнены СЗМ исследования трибоэлектрических зарядов в тонких пленках high-k диэлектриков LaScO<sub>3</sub> и SmScO<sub>3</sub>. Показано, что величина накапливаемых трибоэлектрических зарядов в данных пленках зависит от их толщины. Наиболее сильный эффект наблюдается в пленке LaScO<sub>3</sub> толщиной 6 нм. Также экспериментально обнаружена зависимость величины регистрируемого потенциала от силы прижима зонда.

## Введение

Схема реализации трибоэлектрического наногенератора (TENG) заключается в контакте двух трибоэлектрических слоев, между которыми происходит взаимодействие, например, постукивание, осцилляции или трение. Это приводит к возникновению импульсных емкостных токов во внешней цепи [1]. Значения этих трибоэлектрических токов невелики, однако, их может быть достаточно для питания миниатюрных светодиодов или сенсоров.

В этой связи становится актуальным поиск таких материалов, токи между которыми будут наибольшими. Этот поиск предполагает построение так называемых трибоэлектрических рядов, т.е. упорядочение различных материалов (как правило это тонкие диэлектрики, полупроводники) по шкале способности накапливать трибоэлектрический заряд того или иного знака. В левой части такого ряда находятся среды, которые захватывают отрицательный заряд, а в правой части – положительный заряд. Оптимальная пара материалов для TENG должна состоять из материалов, максимально далеко разнесенных друг от друга в трибоэлектрическом ряду. В данной работе методами СЗМ исследовалось влияние химического состава и толщины тонких диэлектрических (LaScO<sub>3</sub>, SmScO<sub>3</sub>, PZT) и полупроводниковых (MoS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>) слоев на величину трибоэлектрического заряда.

## Методика измерения

Измерение поверхностной плотности трибоэлектрического заряда с помощью СЗМ состоит из сле-

дующих стадий: (1) СЗМ-зонд приводится в контакт с поверхностью исследуемого материала, а затем выполняется сканирование квадратной области с заданной силой прижима  $F$  (в диапазоне от нескольких наноНьютонов до микроНьютонов), (2) в режиме Кельвин-зонд микроскопии фиксируется потенциал  $U$  трибоэлектрических зарядов, возникший в области контакта зонда с поверхностью, (3) вычисляется величина поверхностной плотности трибоэлектрического заряда  $\sigma_{tr}$ .

Все измерения проводились на микроскопе Solver P47 в атмосферных условиях и использовались одинаковые по своим характеристикам зонды серии HA\_FM (TipsNano) [2].

Для проведения корректных измерений трибоэлектрического потенциала важно исключить эффект паразитной подзарядки поверхности. Для этого необходимо: (1) предварительно измерить потенциал поверхности  $U_{surf}$ , (2) выполнить сканирование квадратной области, подавая на зонд потенциал, равный потенциалу поверхности  $U_{probe}=U_{surf}$ .

Если не выровнять потенциалы на зонде и на поверхности, то на последней будет накапливаться заряд, не связанный с трибоэлектрическим зарядом.

В результате, на пленке будет наблюдаться подзаряженная область того или иного знака (см. Рисунок 1). На Рис.1 приведено изображение отрицательно подзаряженной области, возникшей в результате трибоэлектрического воздействия при  $U_{probe} < U_{surf}$ .

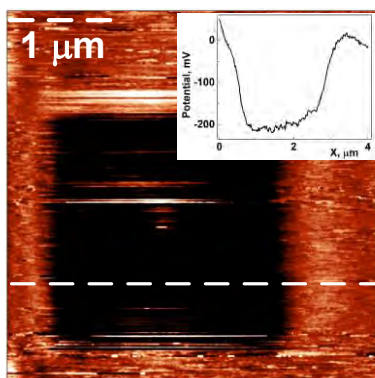


Рис. 1. Отрицательно подзаряженная область на поверхности пленки  $\text{LaScO}_3$ , полученная при  $U_{\text{probe}} < U_{\text{surf}}$

## Результаты

С помощью методов СЗМ были изучены величины трибоэлектрических потенциалов в пленках high-k диэлектриков  $\text{LaScO}_3$  и  $\text{SmScO}_3$ . Экспериментально установлено, что образование трибоэлектрического заряда существенно зависит от толщины пленки. Так на пленках  $\text{SmScO}_3$  и  $\text{LaScO}_3$  толщиной 12 нм и 20 нм величина трибоэлектрического потенциала составляла менее 10 мВ, при этом на пленке толщиной 6 нм величина потенциала составляла порядка 60 мВ (см. Рисунок 2).

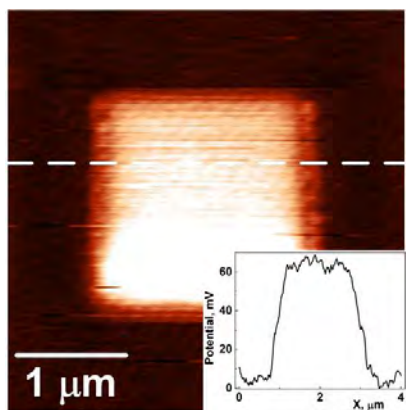


Рис. 2. Поверхностный трибоэлектрический потенциал на поверхности пленки  $\text{LaScO}_3$

Также было обнаружено, что величина трибоэлектрического потенциала ( $U_{\text{tr}}$ ) зависит от силы прижима ( $F$ ) СЗМ-зонда к поверхности. На рисунке 3 представлена зависимость  $U_{\text{tr}}(F)$ . Видно, что с ростом силы прижима до 400 нН наблюдается постепенное увеличение трибоэлектрического потенциала, а затем наступает насыщение на уровне ~80 мВ.

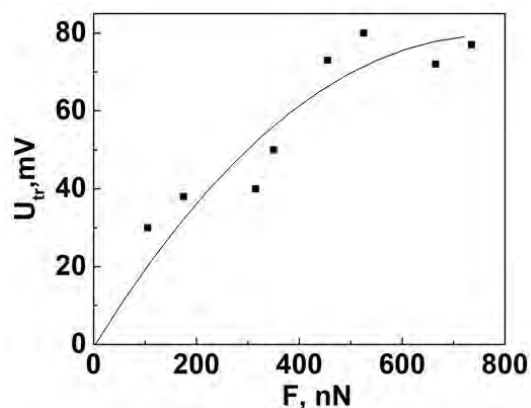


Рисунок 3. Зависимость величина потенциала  $U_{\text{tr}}$  от силы прижима  $F$  для пленки  $\text{LaScO}_3$  толщиной 6 нм.

Аналогичным образом были проведены измерения трибоэлектрического потенциала на полупроводниковых плёнках  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WSe}_2$  толщиной 20-30 нм и плёнке  $\text{PbZrTiO}_3$  (PZT) толщиной 100 нм. Измеренное значение трибоэлектрического потенциала в  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WSe}_2$  оказывается достаточно малым и составляет порядка 10-20 мВ. В PZT пленке, имеющей зернистую структуру, измеренное значение трибоэлектрического потенциала составляет около 150 мВ. Данный результат может быть связан с накоплением нескомпенсированного поляризационного заряда в границах зёрен [3].

## Выводы

Разработан метод регистрации «чистого» трибоэлектрического потенциала в тонких плёнках с помощью методов СЗМ. Определён вид зависимости трибоэлектрического потенциала от величины силы прижима СЗМ-зонда к поверхности. Наиболее существенное накопление трибоэлектрического заряда наблюдается в пленках  $\text{LaScO}_3$  толщиной 6 нм ( $U_{\text{tr}} \sim 80$  мВ) и PZT-плёнках толщиной 100 нм ( $U_{\text{tr}} \sim 150$  мВ), что может быть обусловлено накоплением нескомпенсированного поляризационного заряда в границах зёрен.

## Литература

1. Y. Liu, J. Ping, Y. Ying // *Advanced Functional Materials*, V. 31, 2009994 (2021).
2. <https://tipsnano.com/catalog/>
3. Л.А. Делимова, Е.В. Гуцина, Е.В. и др. // *ФТТ*, Т. 60(3), 547-552 (2018).

# Модификация углеродных слоев при высокотемпературном отжиге

Ю.А. Данилов<sup>1,2</sup>, Р.Н. Крюков<sup>1,2,\*</sup>, В.П. Лесников<sup>2</sup>, Д.Е. Николичев<sup>1,2</sup>, С.Ю. Зубков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup>НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*kriukov.ruslan@yandex.ru

Изохронный высокотемпературный отжиг углеродных пленок в условиях сверхвысокого вакуума приводит к уменьшению слоевого сопротивления в ~ 8 раз. Отжиг не сопровождается значительным сокращением толщины пленки, несмотря на увеличение давления в камере в процессе отжига в ~ 10 раз. Наиболее серьезные изменения параметров пленки происходят при температуре 650°C.

## Введение

Углеродные покрытия являются предметом интенсивных исследований по причине уникальности физико-химических свойств: высокой проводимости и теплопроводности, следствием чего является широкий круг их практического применения [1,2]. Вместе с тем, ведется поиск путей регулирования и улучшения характеристик углеродных пленок, и одним из традиционных методов постростовой обработки этих наноструктур является высокотемпературный отжиг.

## Методика эксперимента

В работе анализировались углеродные слои, созданные на подложке-структуре SiO<sub>2</sub>/Si. Температура формирования составляла 500°C, слои осаждались путем лазерного распыления пирографита в течение 100 с. Исследование характеристик систем проводилось в сверхвысоковакуумном комплексе Omicron Multiprobe RM (Omicron, Германия), состоящем из двух основных камер. В технологической камере производился изохронный отжиг в течение 20 с при температурах 550-600-650-700-750°C и давлении в камере менее 10<sup>-5</sup>Торр. Образец размещался над предварительно разогретым до нужной температуры нагревателем и по истечению времени убирался. Далее образец в условиях высокого вакуума перемещался в аналитическую камеру, где давление остаточных газов составляло 10<sup>-9</sup> Торр. После этого производилось исследование методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). При возбуждении линией Al Kα регистрировались ФЭ-линии C 1s, O 1s, Si 2p, а также валентная зона. Математическая обработка

спектров проводилась с использованием программного обеспечения SDP v. 4.3.

Образцы перед и после проведения отжига подвергались исследованию на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver Pro (NT-MDT, Россия). В дополнение к этому на образцах были проведены измерения эффекта Холла на установке HL5500 (Nanometrics Incorporated, США) при температуре 300 К.

## Результаты

Поскольку отжиг в условиях сверхвысокого вакуума предположительно может сопровождаться десорбцией пленки, при проведении эксперимента отслеживалось давление в камере, а также с использованием методики [3] оценивалась толщина пленки. Результаты одного из экспериментов по определению толщины представлены на рис. 1.

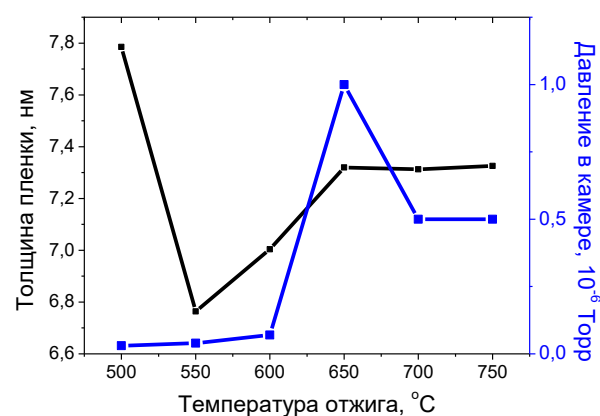
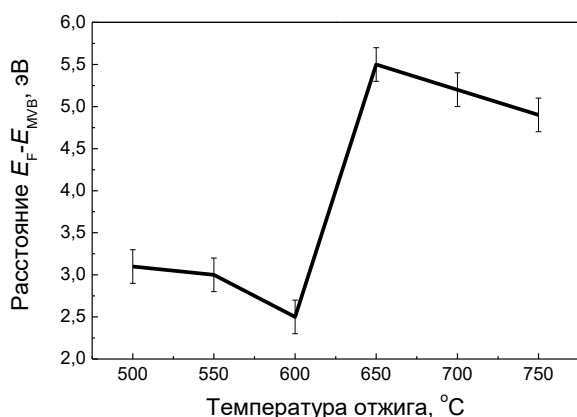


Рис. 1. Температурные зависимости толщины углеродной пленки после отжига и давление в камере в процессе отжига

Из результатов следует, что каких-либо явных изменений толщины пленки не происходило. Хотя наблюдалось уменьшение концентрации кислорода на поверхности пленки, что регистрировалось по интенсивности ФЭ-линии O 1s. Изменение давления в камере вероятно связано с нагревом самого держателя и десорбцией загрязнений и/или материала пленок. При этом остающаяся без изменения толщина, возможно, связана с изменением их плотности. В ходе исследования поверхности пленок методом АСМ было зарегистрировано увеличение шероховатости пленки в  $\sim 2$  раза после отжига при  $750^\circ\text{C}$ .

В результате анализа спектра валентной зоны было зарегистрировано изменение энергетического расстояния между уровнем Ферми и максимумом валентной зоны (рисунок 2), которое измерялось согласно [4]. Из температурной зависимости хорошо видно, что отжиг при  $650^\circ\text{C}$  провоцирует резкий скачок энергетического промежутка. Причина такого изменения характеристики на данный момент до конца не выяснена.

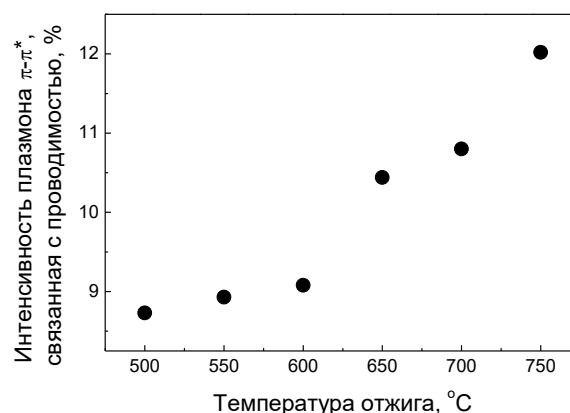


**Рис. 2.** Температурная зависимость энергетического расстояния между максимумом валентной зоны и уровнем Ферми

При анализе ФЭ-линии C 1s было зарегистрировано увеличение интенсивности  $\pi-\pi^*$  плазмона (рисунок 3), что согласно [5], указывает на увеличение количества делокализованных электронов, образующих соответствующую связь в  $sp^2$ -углероде.

Этот факт является основанием считать, что отжиг приводит к увеличению проводимости пленок.

Подтверждением этого факта являются результаты холловских измерений, в результате которых было установлено, что изохронный отжиг приводит к уменьшению слоевого сопротивления в 8 раз.



**Рис. 3.** Температурная зависимость относительной интенсивности  $\pi-\pi^*$  плазмона

Таким образом, изохронный отжиг в вакууме приводит к уменьшению слоевого сопротивления. При отжиге происходит изменение энергетического расстояния между максимумом валентной зоны и уровнем Ферми. Шероховатость поверхности после отжига возрастает в 2 раза, слоевая проводимость углеродных слоев увеличивается до 8 раз.

Исследование выполнено в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (проект Н-480-99).

## Литература

1. Z.A. Ansari, T.J. Singh, S.M. Islam *et al.* // *Optik*, V. 182, 500 (2019).
2. A.V. Alaferdov, R. Savu, T.A. Rackauskas *et al.* // *Nanotechnology*, V. 27, 375501 (2016).
3. P.J. Cumpson, P.C. Zalm // *Surface and Interface Analysis*, V.209, 403 (2000).
4. D.C. Hays, B.P. Gila, S.J. Pearton *et al.* // *Applied Physics Reviews*, V. 4, 2 (2017).
5. A.T. Brown, J. Lin, J.P. Vizuet *et al.* // *ACS Omega*, V.6(46), 31066(2021).



# Легирование слоев GaAs, полученных методом импульсного лазерного нанесения

Ю.А. Данилов<sup>1,\*</sup>, О.В. Вихрова<sup>1</sup>, А.В. Здоровейщев<sup>1</sup>, Р.Н. Крюков<sup>1</sup>, В.П. Лесников<sup>1</sup>, А.Е. Парафин<sup>2</sup>, Н.А. Ильин<sup>1</sup>, Е.А. Питиримова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603022.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 603087.

\*danilov@nifti.unn.ru

Показано, что легирование GaAs в процессе импульсного лазерного нанесения позволяет получать нанослои n- или p-типа проводимости с высокой концентрацией свободных носителей. Используются примеси Te, Si (доноры) и Be, Mg (акцепторы). Для активации примесных атомов использован быстрый термический отжиг и импульсный наносекундный отжиг с применением излучения эксимерного KrF лазера.

Метод формирования слоев GaAs импульсным лазерным нанесением (ИЛН) известен достаточно давно [1]. В ряде применений (например, для создания магнитных полупроводников) он показал высокую эффективность [2]. Однако, о легировании в процессе нанесения слоев традиционными донорными или акцепторными примесями в литературе данных нет. И если при формировании слоев GaAs:Mn необходимости в дополнительном легировании нет, поскольку атомы марганца, кроме поставки магнитных моментов, являются акцепторами в GaAs, то в случае GaAs:Fe ситуация меняется: железо является глубокой примесью, а слои – высокоомными [3]. Поэтому при формировании магнитного полупроводника GaAs:Fe перспективно дополнительное легирование для создания свободных носителей – дырок или электронов. В настоящей работе исследовано вхождение ряда традиционных для полупроводников A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> доноров (Te, Si) и акцепторов (Be, Mg) в решетку GaAs в процессе ИЛН и при последующем отжиге.

## Методика эксперимента

Для распыления нелегированного GaAs и легирующих элементарных веществ использовался АИГ:Nd лазер, работающий на второй гармонике ( $\lambda = 532$  нм). Длительность импульсов составляла 10 нс, энергия 250 мДж, частота повторения 10 Гц. Излучение вводилось в вакуумную камеру (давление не выше  $10^{-6}$  Торр) и фокусировалось на распыляемой мишени в пятно площадью порядка  $1.5 \times 10^{-2}$  см<sup>2</sup>. Расстояние от мишени до подогреваемой подложки составляло около 5 см. Лазерный пучок описывал окружность диаметром  $D \approx 15$  мм на мишени. Для легирования на GaAs-мишень

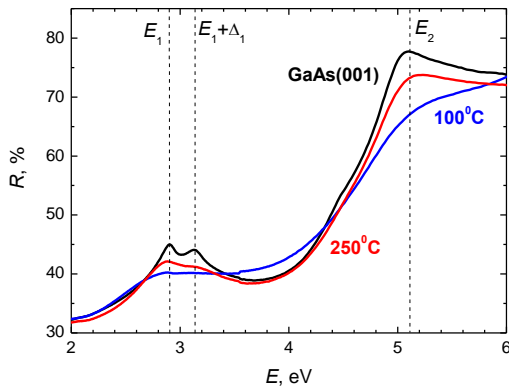
накладывался сектор из легирующего материала (металлических Te, Mg, Be или слабелегированного Si). Концентрация введенной примеси оценивалась величиной  $Y_{пр} = d/\pi D$ , где  $d$  – длина хорды легирующего материала. Толщина слоя GaAs на подложке i-GaAs(001) составляла около 40 нм (время нанесения = 20°-25 мин). Температура нанесения варьировалась в диапазоне 60°-450°С. Для повышения электрической активности введенных примесей использовали методы быстрого термического отжига (БТО) (установка JetFirst100, поток аргона, время процесса 15 с) и импульсного лазерного отжига (ИЛО) (эксимерный KrF лазер,  $\lambda = 248$  нм, длительность импульса 30 нс). Для исследования структуры и свойств слоев использованы: электронография на отражение (электронограф ЭМР-102, ускоряющее напряжение 50 кВ), спектроскопия коэффициента отражения в диапазоне энергий квантов 1°-6 эВ, измерения эффекта Холла в геометрии Ван-дер-Пау (установка Nanometrics HL5500).

## Результаты и обсуждение

Структуры, представляющие собой нанесенный методом ИЛН слой нелегированного арсенида галлия на подложке i-GaAs, для всех исследованных температур нанесения имеют высокое поверхностное сопротивление  $R_s$ , сравнимое с сопротивлением самой полуизолирующей подложки ( $R_s = 5.4 \times 10^9$  Ом), и n-тип проводимости. Структуру можно представить как параллельное соединение двух резисторов: нанесенного слоя и подложки. Тогда сопротивление нанесенного специально нелегированного слоя GaAs может быть определено: оно зависит от температуры нанесения

и превышает  $3.4 \times 10^8$  Ом. Максимум слоевого сопротивления  $(6.5^\circ\text{--}8.4) \times 10^9$  Ом получен для  $T_g = 250^\circ\text{--}300^\circ\text{C}$ . Это значение соответствует удельному сопротивлению  $\sim 3 \times 10^4$  Ом·см, что свидетельствует об отсутствии заметного нежелательного легирования слоев при использовании в качестве мишени только пластины GaAs.

На рисунке 1 показаны спектры оптического отражения нанесенного GaAs при варьировании  $T_g$ .



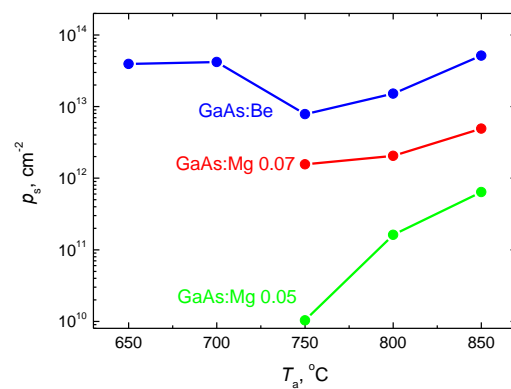
**Рис. 1.** Спектры отражения монокристаллического GaAs и структур с нелегированными слоями, нанесенными при  $T_g = 100$  и  $250^\circ\text{C}$

Спектр отражения монокристаллического GaAs (рисунком 1) содержит характерный дублет пиков при энергиях 2.90 и 3.14 эВ (отмечен вертикальными пунктирными линиями), соответствующий межзонным переходам вне центра зоны Бриллюэна ( $E_1$ ) и переходам с участием спин-орбитально отщепленной ветви ( $E_1 + \Delta_1$ ). Пик  $E_2$  (5.12 эВ) связан с межзонными переходами типа  $X_5 \rightarrow X_1$ . Для GaAs, нанесенного при  $T_g = 100^\circ\text{C}$ , спектр не содержит характерных пиков, что говорит об аморфном состоянии слоя. Для процесса с  $T_g = 250^\circ\text{C}$  спектр подобен спектру монокристаллического GaAs.

После нанесения легированные слои GaAs были высокоомными (так, для GaAs:Si при  $T_g = 400^\circ\text{C}$  величина  $R_s$  превышала  $3 \times 10^7$  Ом). Легированные слои, как правило, наносились при  $T_g = 100^\circ\text{C}$ . Термический отжиг GaAs-слоев, легированных донорами Te ( $Y_{\text{Te}} = 0.05$ ) или Si ( $Y_{\text{Si}} = 0.06$ ), при температурах вплоть до  $850^\circ\text{--}900^\circ\text{C}$  не приводил к их электрической активации. Характерны высокие значения сопротивления слоев, а также p-тип проводимости. Отжиг лазером дает значительную электрическую активацию и Te, и Si: n-тип про-

димости и значения концентрации электронов до  $1.4 \times 10^{19}$  (GaAs:Te) и  $6 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (GaAs:Si). Последнее значение значительно превышает концентрации, достижимые в эпитаксиальных процессах получения GaAs:Si (обычно не выше  $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) за счет неравновесности метода ИЛО.

Термический (до  $850^\circ\text{C}$ ) отжиг GaAs, легированного Be ( $Y_{\text{Be}} = 0.09$ ) или Mg ( $Y_{\text{Mg}}$  до 0.07), приводит к формированию слоев p-типа с объемной концентрацией дырок  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для GaAs:Mg и  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  для GaAs:Be. На рис. 2 показаны зависимости слоевой концентрации дырок от температуры ( $T_a$ ) БТО. Отметим, что при  $T_a = 650$  и  $700^\circ\text{C}$  значения подвижности дырок очень низки ( $< 25 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ).



**Рис. 2.** Зависимости слоевой концентрации дырок от температуры БТО для GaAs:Be и GaAs:Mg

Сверхвысокие концентрации дырок достигаются при ИЛО:  $3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для Be и  $(5^\circ\text{--}7) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для Mg. Как для легирования GaAs донорами, так и акцепторами при ИЛО отмечается пороговая плотность энергии ( $300 \text{ мДж}/\text{см}^2$ ), при которой происходит эпитаксиальная кристаллизация легированного GaAs.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 19-19-00545).

## Литература

1. С.В. Гапонов, М.Д. Стриковский, М.А. Калягин // Изв. АН СССР, сер. Физ., Т. 49, 758 (1985).
2. Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов и др. // Опт. Журн., Т.75 (6), 56 (2008).
3. A.V. Kudrin, V.P. Lesnikov, Yu.A. Danilov *et al.* // Semicond. Sci. Technol., V.35, 125032 (2020).

# Исследование структурного состояния МЛЭ-гетероструктур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs методом генерации второй гармоники

С.А. Дворецкий<sup>1, 4, \*</sup>, М.Ф. Ступак<sup>2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>1, 3</sup>, С.Н. Макаров<sup>2</sup>,  
А.Г. Елесин<sup>2</sup>, А.Г. Верхогляд<sup>2</sup>

1 Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

2 Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, ул. Русская, 416 Новосибирск, 630058.

3 Новосибирский государственный университет (НГУ), ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090.

4 Томский государственный университет (ТГУ), пр. Ленина, 36, Томск, 634050.

\*dvor@isp.nsc.ru

Проведено исследование кристаллического совершенства слоев HgCdTe гетероструктур, выращенных на подложках (013)GaAs и поворота ориентации в плоскости (угол  $\varphi$ ) и перпендикулярном направлении роста (угол  $\theta$ ) методом генерации второй гармоники. Наблюдалось изменение угла  $\varphi$  на 3-8 угловых градусов и угла  $\theta$  на 5 угловых градусов с немонотонным изменением по толщине в рабочем и варизонных слоях. Абсолютное значение угла  $\theta$  может быть использовано для качественной оценки кристаллического совершенства слоев HgCdTe.

## Введение

Метод генерации второй гармоники (ГВГ) позволяет проводить экспрессные бесконтактные измерения структурного совершенства кристаллов с высоким локальным разрешением в тонких приповерхностных слоях [1]. Метод ГВГ дает детальную информацию о кристаллической структуре для кристаллов без центра инверсии. Многие полупроводники типа АЗВ5 и А2В6 имеют кристаллическую структуру без центра инверсии. Для кристаллов GaAs, эпитаксиальных слоев CdTe на различных подложках и гетероэпитаксиальных структур HgCdTe на подложках из GaAs и Si метод ГВГ показал высокую эффективность и позволил получить новые данные при изменении кристаллического совершенства [2,3,4].

Нами представлены результаты по исследованию структурного состояния гетероструктур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs, выращенных методом МЛЭ, и поворота ориентации (013) в азимутальной плоскости и в перпендикулярном направлении в различных слоях структуры и по толщине слоя HgCdTe высокочувствительным методом ГВГ.

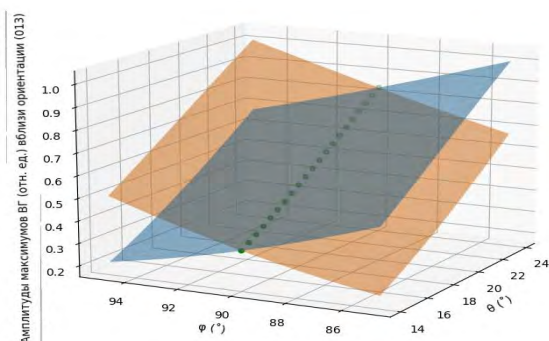
## Результаты и обсуждение

Проведены исследования структурного совершенства слоев (013)HgCdTe с варизонными слоями на границах однородного слоя на подложке CdTe/ZnTe/GaAs и поворота плоскости ориентации

по измерениям азимутальной зависимости интенсивности сигнала ГВГ *ex-situ*. Слои HgCdTe с толщиной рабочего слоя 6 -10 мкм выращивались с нижним варизонным слоем с изменением состава от 0,45 до 0,22 толщиной ~ 1,5 мкм, и верхним варизонным слоем с изменением состава от 0,22 до 0,4 с толщиной ~0,5 мкм на подложках CdTe(5,5 мкм)/ZnTe(30 мкм)/GaAs(400 мкм). Для анализа азимутальных зависимостей ГВГ проводилось сравнение экспериментальных результатов с расчетными данными, полученными при численном моделировании идеального кристалла с ориентациями по углам  $\varphi$  и  $\theta$  вблизи заданной ориентации (013). Точность определения угла  $\varphi$  составляет  $\pm 1$  угловых градусов. Разворот по углу  $\varphi$  в плоскости ориентации (013) составил от 3 до 8 угл. град. для слоев CdTe после выращивания [3, 4]. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по развороту слоев CdTe при рентгеновских исследованиях [5]. Для слоев HgCdTe наблюдалось немонотонное изменение угла  $\varphi$  по толщине с незначительным уменьшением значений при переходе от варизонных к рабочим слоям. В рабочих слоях наблюдалось постоянное значение угла  $\varphi$ .

Угол  $\theta$  определяет отклонение направления ориентации подложки от направления плоскостей (001) в структуре цинковой обманки. Для ориентации (013) этот угол составляет 18,46 угл. град. Было показано [3,4], что изменения сигнала ВГ по углу  $\theta$  (при фикс-

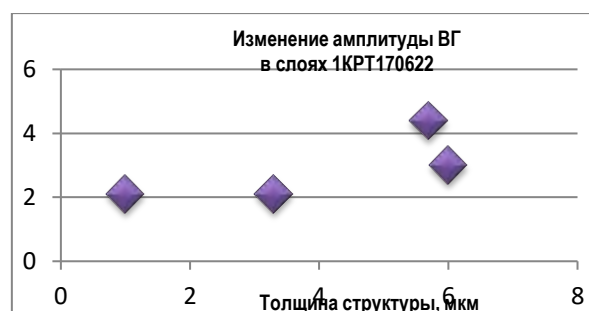
сированном угле  $\varphi$ ) вблизи ориентации (013) приводят к простому изменению амплитуды всех максимумов графиков зависимости интенсивности ВГ от азимутального угла без изменения соотношений между максимумами. Проведенный анализ изменения амплитуд двух соседних максимумов модельных азимутальных зависимостей сигнала ВГ в окрестности угла  $\theta \approx 19$  угл. градусов (см. рис. 1) показывает, что при увеличении угла  $\theta$  на 8 градусов амплитуда сигнала ВГ увеличивается в два раза линейным образом от угла  $\theta$ . Это означает, что без контроля амплитуды сигнала ВГ в эксперименте с однотипными образцами со структурой цинковой обманки погрешность определения угла  $\theta$  методом ГВГ вблизи ориентации (013) может достигать значений  $\pm 5$  угловых градусов. Если же в серии экспериментов наблюдаются незначительные отличия амплитуд сигналов ВГ от различных поверхностей однотипных исследуемых структур, то это позволяет предположить, что вариации угла  $\theta$  находятся в пределах максимум 2-3 градусов.



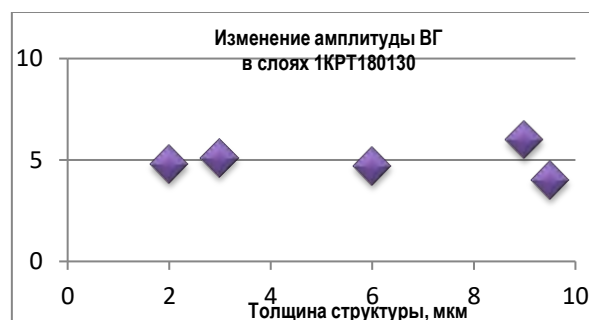
**Рис. 1.** Поведение амплитуд двух соседних максимумов азимутальных графиков сигнала ВГ в окрестности ориентации (013) в зависимости от углов  $\theta$  и  $\varphi$ . Точная ориентация (013) определена углами  $\theta \approx 19^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  (отсчет от ориентации (001))

Для исследования динамики изменения угла  $\theta$  в по толщине рабочего слоя для двух исследуемых образцов при послойном травлении были построены графики абсолютных значений амплитуд азимутального сигнала ВГ при одинаковых уровнях возбуждающего излучения 0,06 Вт, неизменной чувствительности приемного тракта (Рис. 2,3). Интенсивность сигнала ГВГ для поверхности верхнего варизонного слоя меньше сигнала от рабочего слоя, что приводит к отличию значений угла  $\theta$ . Угол  $\theta$  имеет практически постоянное значение в рабочем слое и увеличивается к поверхности верхнего варизонного слоя. Абсолютное значение угла  $\theta$  в рабочем слое HgCdTe для структуры 1КРТ170622 на  $8 \div 10$  градусов меньше, чем в рабочем слое HgCdTe для структуры

1КРТ180130 при условии одинакового кристаллического совершенства структур. Это значит, что для структуры 1КРТ170622 кристаллическое совершенство слоя HgCdTe значительно ниже, чем для структуры 1КРТ180130. При выращивании структуры 1КРТ170622 наблюдалось значительное уменьшение эллипсометрического угла  $\Psi$ , что связано с огрублением поверхности. Таким образом, проводя сравнение угла  $\theta$  для выращенных структур со значением угла  $\theta$  для эталонного образца HgCdTe, можно качественно проводить оценку кристаллического совершенства.



**Рисунок. 2.** Изменение значений амплитуд азимутального сигнала ВГ для серии травлений образца 1КРТ170622



**Рис. 2.** Изменение значений амплитуд азимутального сигнала ВГ для серии травлений образца 1КРТ180130

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20053) и Volkswagen Stiftung Program (No. 97738).

## Литература

1. С.А. Ахманов, В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев et.al. // УФН., Т. 147, 675 (1985)
2. [2] В.В. Баланюк, В.Ф.Краснов, С.Л. Мушер et.al. // Квантовая электроника, Т. 22, 196 (1995)
3. М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий et.al. //Автометрия, Т. 55,31 (2019)
4. М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий et.al // ЖТФ, Т. 91, 1799 (2021)
5. Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, В.С. Варавин et.al. // ФТТ, Т. 57, 2095 (2015).

# Эффект Керра, индуцированный обменным взаимодействием электронов в асимметричных двойных квантовых ямах

М.М. Дегоев<sup>1,\*</sup>, М.М. Афанасьев<sup>1</sup>, В.К. Калевич<sup>1,§</sup>, К.В. Кавокин<sup>2</sup>, Н.В. Козырев<sup>1</sup>, G. Karczewski<sup>3</sup>, Ю.Г. Куряев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, д. 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> Лаборатория оптики спина, Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, Санкт-Петербург, 198504.

<sup>3</sup> Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, 02-668 Warsaw, Poland.

\*degoev98@mail.ru, §kalevich@solid.ioffe.ru

В туннельно-связанных квантовых ямах разной ширины мы обнаружили, что динамика намагниченности, возникающей при резонансной оптической импульсной накачке экситона в узкой яме, включает динамику намагниченности электронов в широкой яме, хотя электронный уровень в широкой яме на 55 мэВ ниже электронного уровня в узкой яме. Мы связываем такой эффект с расщеплением электронных уровней, индуцированным обменным взаимодействием со спин-поляризованными электронами в широкой яме, рожденными при резонансном возбуждении узкой ямы.

Исследованная структура состоит из широкой (20 нм) немагнитной ямы CdTe и узкой (8 нм) магнитной ямы Cd<sub>0.98</sub>Mn<sub>0.02</sub>Te, разделенных туннельно-прозрачным барьером из Cd<sub>0.88</sub>Mg<sub>0.12</sub>Te шириной 1.6 нм (5 монослоев). Температура образца  $T = 6$  К. Мы измеряли когерентную спиновую динамику с пикосекундным разрешением с помощью магнито-оптического эффекта Керра в режиме накачка-зондирование в магнитном поле, перпендикулярном направлению возбуждающего луча. Накачивающие и зондирующие импульсы с одинаковой длиной волны (одноцветный эксперимент) и длительностью 1.5 пс вырабатывались перестраиваемым Ti:Sa лазером, позволяя осуществлять резонансное возбуждение основных экситонных состояний в узкой или широкой ямах. Измеренные сигналы керровского отражения описываются суммой экспоненциально затухающих компонент вида  $A \cdot \exp(-t/\tau) \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $\tau$  – время затухания,  $\omega = g\mu_B B/\hbar$  – ларморовская частота прецессии спина в магнитном поле  $B$ ,  $g$  – абсолютная величина  $g$ -фактора,  $\varphi$  – фаза.

## Результаты и обсуждение

При резонансной накачке экситона в узкой яме (NQW) наблюдаются две компоненты, быстрая ( $\tau_1 \approx 47$  пс) и медленная ( $\tau_2 \sim 700$  пс), осциллирующие соответственно с  $g$ -факторами  $g_1 \approx 1.55$  и  $g_2 = 2$  и отношением амплитуд  $A_1/A_2 \approx 6$  (Рис. 1). Поскольку  $g$ -фактор марганца  $g_{Mn} = 2$ , то можно заключить, что медленно затухающая компонента создана намагниченностью ионов марганца. Нали-

чие компоненты с  $g_1 \approx 1.55$  является неожиданным, поскольку узкая яма должна быть пустой, так как фотовозбужденные в ней носители быстро туннелируют в широкую яму.

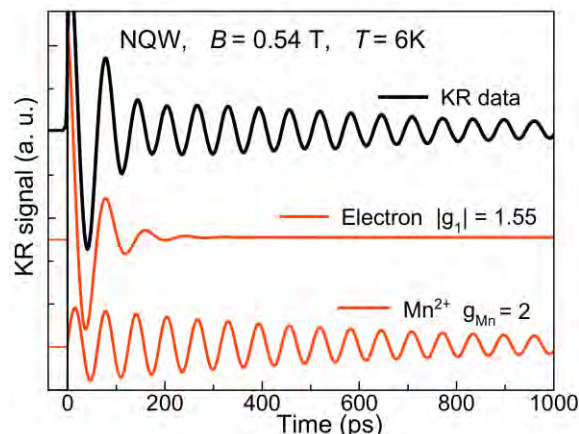
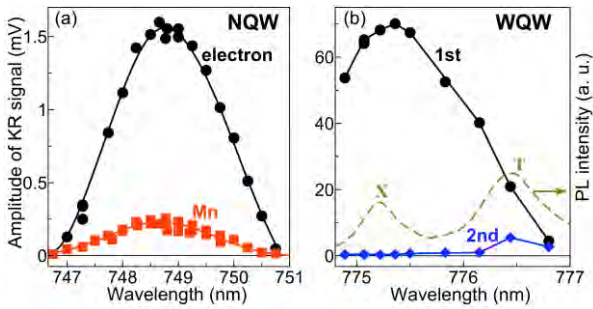


Рис. 1. Керровский сигнал в перпендикулярном магнитном поле  $B = 0.54$  Т в узкой яме (черная кривая) и его аппроксимация двумя компонентами (красные кривые)

Вместе с тем, при резонансной накачке экситона в широкой яме (WQW) наблюдаются три осциллирующие компоненты с резко различающимися амплитудами  $A$  и временами распада  $\tau$ , среди которых первая и самая быстрая компонента доминирует:  $A_1/A_2 \sim 100$ ,  $A_1/A_3 \sim 1000$  (Рис. 2, в силу малости 3-я компонента не показана),  $\tau_1 \approx 45$  пс,  $\tau_2 \sim 200$  пс,  $\tau_3 \sim 800$  пс. При этом  $g$ -факторы этих компонент близки по величине,  $g_1 \approx 1.56$ ,  $g_2 \approx 1.52$ ,  $g_3 \approx 1.48$ , и близки к значениям  $g$ -факторов электронов, связанных в экситон, и резидентных электронов в широкой яме [1].





**Рис. 2.** Спектральная зависимость амплитуд быстрой и медленной компонент керровского сигнала в узкой (а) и широкой (б) ямах. Штриховая кривая на панели (б) представляет спектр фотолюминесценции широкой ямы, измеренный при надбарьерном возбуждении He-Ne лазером

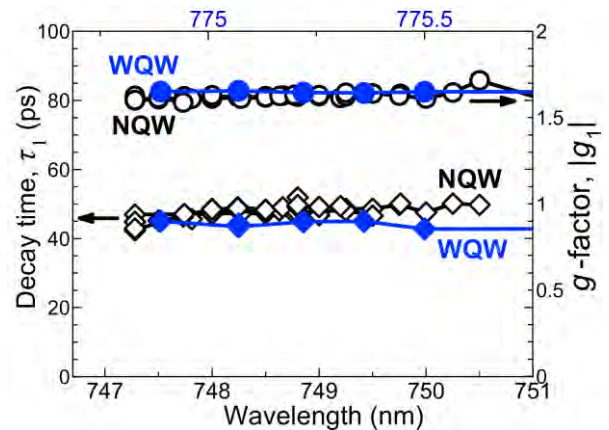
Времена когерентности и  $g$ -факторы быстрых (доминирующих) компонент, зарегистрированных в области экситонных резонансов в широкой и узкой ямах, приведены на Рис. 3. Их равенство позволяет предположить, что быстрая компонента Керровского сигнала, резонансного с экситонным уровнем в узкой яме, отражает осцилляции намагниченности электронов в широкой яме.

Этот эффект может быть обусловлен двумя причинами: 1) Модуляцией показателей преломления для циркулярно поляризованных компонент пробного линейно поляризованного луча на крыле основного экситонного резонанса широкой ямы (нерезонансный вклад). 2) Модуляцией резонансного вклада в показатели преломления циркулярных компонент, обусловленные расщеплением основного экситонного состояния узкой ямы и/или возбужденных состояний широкой ямы.

Нерезонансный вклад может быть индуцирован как кинетическим (селективные по спину виртуальные переходы в трионное состояние), так и потенциальным (спин-зависимая часть кулоновского взаимодействия) обменным взаимодействием. Для резонансных вкладов потенциальный обмен является

доминирующим механизмом. Имеющиеся экспериментальные данные не позволяют однозначно разделить вышеперечисленные вклады, однако можно предположить, что потенциальный обмен является основным связующим механизмом между спином электронов в основном состоянии широкой ямы и наблюдаемым вращением плоскости линейной поляризации пробного пучка, резонансного с экситонным уровнем в узкой яме.

Для выяснения роли рассмотренных вкладов проводятся дополнительные исследования.



**Рис. 3.** Спектральные зависимости времен когерентности (ромбы) и  $g$ -факторов (кружки) быстрых компонент керровских сигналов, измеренных в области экситонных резонансов в широкой (заполненные символы) и узкой (пустые символы) ямах

**Благодарности**

ММД, ММА, НВК и ЮГК благодарят проект РФФИ 19-52-12066 за финансовую поддержку.

**Литература**

1. E. Kirstein, N. V. Kozyrev, M. M. Afanasiev *et al.* // Physical Review B, V. 101, 035301 (2020).

# Влияние времени формирования на люминесцентные, парамагнитные и транспортные свойства пористого кремния

Е.С. Демидов, Д.А. Афанасьев, Н.Е. Демидова, А.В. Нежданов, А.И. Машин

Нижегородский госуниверситет им. Н.Н. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, корп.3, 603950.

\*demidov@phys.unn.ru

Исследовано влияние времени формирования на ЭПР, ФЛ и транспортные свойства слоёв пористого кремния (ПК), образованных на монокристаллах кремния с различным типом и уровнем легирования (КЭС-0.01, КДБ-2). Обнаружено, что интенсивность ФЛ нелинейно зависит от времени формирования ПК (сверх линейна в случае КЭС-0.01, сублинейна у ПК на КДБ-2), наблюдались пики в зависимости  $I_{\max}(t_f)$  при  $t_f=12$  и 60с. В обоих случаях ПК на КЭС-0.01 и КДБ-2 по мере сокращения  $t_f$  имеет место голубой сдвиг максимума ФЛ  $\lambda_{\max}$  и на кривой  $\lambda_{\max}(t_f)$  имеются пики также при  $t_f=12$  и 60с. Линейная зависимость амплитуды ЭПР  $P_b$  - центров от  $t_f$  ПК на КЭС-0.01 означает равномерное распределение  $P_b$  - центров по объёму слоёв ПК не зависимо от их толщины.

## Введение

Пористый кремний (ПК) обладает уникальными оптическими, люминесцентными, и электрофизическими свойствами [1, 2], привлекает внимание в связи с его интересными свойствами и совместимостью с технологией наиболее распространённой кремниевой микроэлектроники. Согласно [3] ПК представляет собой трехфазную систему из волокон или гранул кремния, окружённых слоем оксида кремния и воздухом между ними. Такая система содержит парамагнитные  $P_b$ -центры, ответственные за подавление фотолюминесценции (ФЛ) ПК, интересна тем, что гранулы или волокна кремния имеют поперечные размеры в единицы нанометров, что позволяет экспериментально наблюдать эффекты, связанные с дискретностью туннелирования электронов при комнатной температуре. В последнее время проявился интерес к сверхтонким слоям ПК. В настоящей работе проведено детальное исследование влияния времени формирования на ЭПР, ФЛ и транспортные свойства слоёв ПК, выращенных на постоянном токе, на монокристаллах кремния с различным типом и уровнем легирования. Определён характер влияния толщины слоёв ПК на его электрофизические свойства.

## Результаты и обсуждение

Как и в [4] пористые слои толщиной  $\approx 2$  мкм формировались на пластинах монокристаллического кремния марок КЭС-0.01, КДБ-2 в смеси 60% плавиковой кислоты и этилового спирта в соотношении 1:1 при средней плотности тока 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Спектры ФЛ исследовались при комнатной темпе-

ратуре на комплексе рамановской спектроскопии NTEGRA Spectra производства компании NT-MDT (г.Зеленоград) с применением лазера с длиной волны 473 нм. Спектры ЭПР снимались на спектрометре EMX фирмы Брукер при 293К.

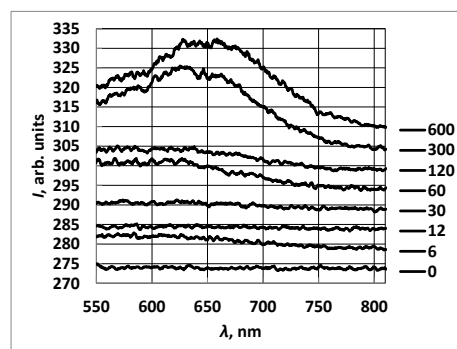
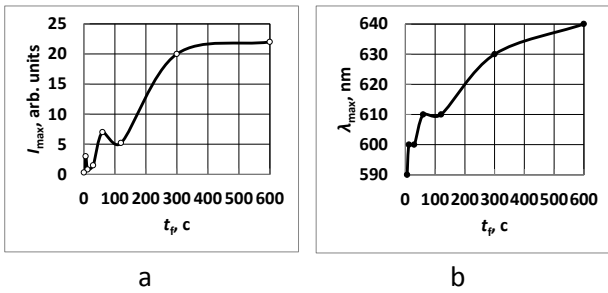


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов ПК на КЭС-0.01 при 293К для разных времён  $t_f$  формирования, показанных цифрами справа в секундах

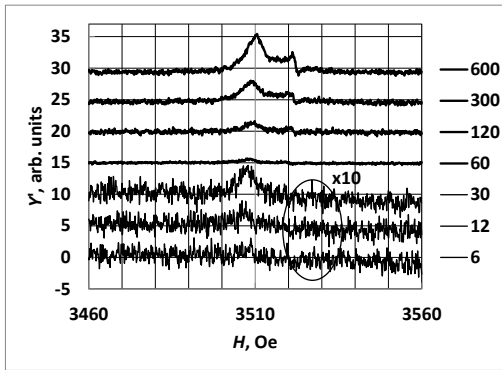
Как показано на рисунке 1, удалось наблюдать ФЛ образцов ПК на КЭС 0.01 при 293К с изменением времени формирования на два порядка от 10 мин до 6 с. Оказалось, что максимум ФЛ  $I_{\max}$  существенно нелинейно и немонотонно зависит от времени формирования  $t_f$  (рисунок 2а). В интервале 300 – 600 с  $I_{\max}$  меняется лишь на 10%, затем по мере спада  $t_f$  происходит быстрый и немонотонный спад, при  $t_f=12$  и 30с имеются всплески ФЛ. Интересно, что по мере сокращения  $t_f$  имеет место голубой сдвиг максимума ФЛ  $\lambda_{\max}$  (рисунок 2б) и на кривой  $\lambda_{\max}(t_f)$  также как и на зависимости  $I_{\max}(t_f)$  при  $t_f=12$  и 60с имеются особенности, природа которых пока не ясна. Хотя голубой сдвиг скорее связан с образованием на начальных стадиях формирования ПК бо-

лее мелкой наноразмерной структуры пористого слоя.



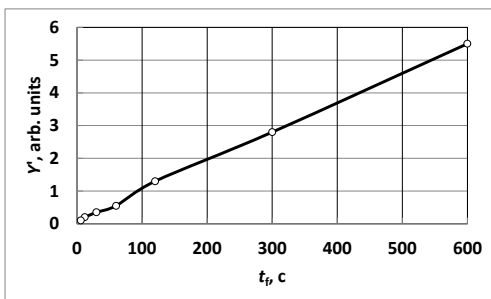
**Рис. 2.** Измеренные при 293К зависимости от времени формирования  $t_f$  слоёв ПК на монокристаллах КЭС-0.01 а - максимума ФЛ  $I_{max}$  и б - положения максимума ФЛ  $\lambda_{max}$

На рисунке 3 приведено семейство спектров ЭПР слоёв ПК на монокристаллах КЭС-0.01 измеренные при 293К. Наблюдается спектр ЭПР от известных  $P_b$  - центров безизлучательной рекомбинации.



**Рис. 3.** Семейство спектров ЭПР слоёв ПК на монокристаллах КЭС-0.01 измеренные при 293К

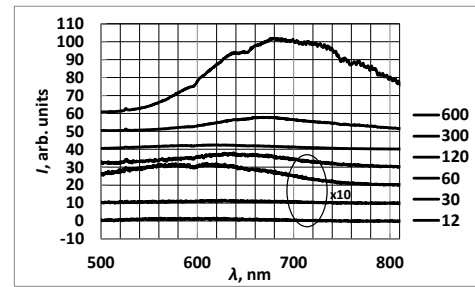
Как оказалось амплитуда этих спектров практически линейно зависит времени формирования ПК (рисунок 4). Если считать, что толщина слоя ПК линейно растёт с временем формирования, линейный график на рисунке 4 означает равномерное распределение  $P_b$  - центров по объёму слоёв ПК не зависимо от их толщины.



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды  $Y$  первой производной спектра поглощения ЭПР  $p_b$  - центров от времени формирования ПК на КЭС-0.01

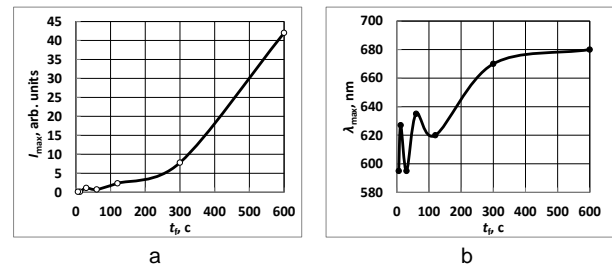
Образцы ПК на КДБ-2 отличаются от таковых на КЭС-0.01 на два порядка большей интенсивностью

ФЛ и при максимальных  $t_f$  их максимумы  $\lambda_{max}$  сдвинуты на 40-50 нм в сторону больших длин волн (рисунок 5).



**Рис. 5.** Спектры ФЛ образцов ПК на КДБ-2 при 293К для разных времён  $t_f$  формирования, показанных цифрами справа в секундах

Другое отличие в затянутом темпе роста интенсивности ФЛ до  $t_f=300$ с и отсутствии существенных всплесков в начале зависимости  $I_{max}(t_f)$ .



**Рис. 6.** Измеренные при 293К зависимости от времени формирования  $t_f$  слоёв ПК на монокристаллах КДБ-2 а - максимума ФЛ  $I_{max}$  и б - положения максимума ФЛ  $\lambda_{max}$

Также как и в случае ПК на Si-n+ в варианте КДБ-2 имеется голубой сдвиг максимума ФЛ  $\lambda_{max}$  с уменьшением  $t_f$  и обнаруживаются ещё более сильные осцилляции в зависимости  $\lambda_{max}(t_f)$ . В согласии с сильной ФЛ ПК на КДБ-2 спектр ЭПР  $P_b$  - центров безизлучательной рекомбинации в этом ПК не был замечен на фоне шума.

В докладе обсуждаются транспортные свойства ПК, в которых проявляются признаки дискретного тунелирования электронов.

### Литература

1. Handbook of Porous Silicon, Leigh Canham Editor, Springer International Publishing Switzerland 2014, 1012 p.
2. Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова // Вестник ННГУ, серия ФТТ, В. 1(8), 22 (2005).
3. E. S. Demidov, V. V. Karzanov, V. G. Shengurov // JETPL, V. 67, 839 (1998).
4. Н.Е. Демидова, А.С. Абросимов, Е.С. Демидов, В.В. Карзанов / ФТТ, 2021, Т. 63, В. 3, С. 370-373.

# Механизмы удаления оксидного слоя с поверхности InP(001) в потоке As<sub>4</sub>

Д.В. Дмитриев\*, Д.А. Колосовский, А.И. Торопов, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*ddmitriev@isp.nsc.ru

Методом дифракции быстрых электронов на отражение *in-situ* исследовано влияние температуры отжига и потока мышьяка на процессы удаления оксидного слоя с поверхности *epi-ready* InP(001). Показано, что удаление оксидного слоя с поверхности InP(001) происходит в результате термического разложения и химического взаимодействия оксидов с As<sub>4</sub>.

## Введение

Возможность создания в одном технологическом процессе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) для монокристаллических интегральных схем, содержащих излучающие, передающие, модулирующие и принимающие свет элементы, делает InP ключевым материалом радиотехники [1]. Рост ГЭС начинается с получения атомарно-чистой поверхности InP подложки путем термической очистки [2]. Для предотвращения неконгруэнтного разложения InP, отжиг осуществляют в потоке мышьяка или фосфора. Отжиг в потоке мышьяка, позволяет получить резкую гетерограницу слой/подложка и избежать неконтролируемого встраивания фосфора в мышьяк-содержащие слои InAlAs/InGaAs, согласованные по параметру кристаллической решетки с подложкой InP(001). При взаимодействии мышьяка с окисленной поверхностью InP формируется твердый раствор InP<sub>1-x</sub>As<sub>x</sub> толщиной 2-3 бислоя [3], состав которого зависит от температуры отжига и потока мышьяка [4]. На сегодняшний день механизмы удаления оксида, трансформации поверхности и формирования слоя InPAs до конца не изучены, однако, очевидно, что понимание этих процессов важно для технологии роста ГЭС на InP. В данной работе, методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), *in-situ* изучены механизмы удаления оксида с поверхности *epi-ready* InP(001) подложки в потоке мышьяка в сверхвысоком вакууме.

## Методика эксперимента

Отжиг *epi-ready* InP(001) подложек производства фирмы АХТ проводился на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Riber Compact-21T. Изменение температуры подложки (Т) задавалось со скоростью 10 град/мин. Стабилизация Т велась по термопаре, а контроль *in-situ* инфракрасным пи-

рометром «Ircan Modline Plus. Поток мышьяка (F<sub>As</sub>) варьировался в широком диапазоне F<sub>As</sub>=0.5-5.0×10<sup>-5</sup> Торр вентильным источником VAC500. Температура крестерной части источника мышьяка составляла 525 °С, что обеспечивало однородный F<sub>As</sub>, состоящий из тетрамеров (As<sub>4</sub>) мышьяка более чем на 98%. Для измерения F<sub>As</sub> использовался вакуумный датчик – ионизационная лампа «Bayard-Alpert JVA», которая помещалась в положение под подложкой.

Предварительная очистка подложки и держателя от легколетучих соединений и воды проводилась при температуре 150 °С в специализированной камере установки МЛЭ, отделённой шибберным затвором от ростовой камеры. Затем оксидный слой с поверхности подложки удалялся в ростовой камере МЛЭ установки прогревом в потоке мышьяка до появления сверхструктуры (4×2). Процесс удаления оксида регистрировался с помощью системы ДБЭО kSA 400 фирмы k-Space Associates.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

Мы наблюдали медленное возрастание интенсивности (00) рефлекса при T>250 °С при нагреве InP в вакууме без потока мышьяка Рисунок 1, что говорит о термическом удалении оксида. В момент подачи потока мышьяка F<sub>As</sub> = 6×10<sup>-6</sup> Торр при T = 300 °С не происходит изменений в зависимости интенсивности (00) рефлекса от температуры, т.е. вклад взаимодействия с мышьяком в утонение оксида незначителен. При T ~ 350 °С характер процесса удаления оксида резко изменяется, что скорее всего связано с активацией химической реакции взаимодействия мышьяка с оксидом. Действительно, согласно закону Вант-Гоффа (1) увеличение температуры ведет к увеличению скорости реакции. Обычно, повышение температуры на 10 граду-

сов приводит к увеличению скорости реакции в 2-4 раза.

$$V_2 / V_1 = \gamma^{(T_2 - T_1)/10} \quad (1),$$

$V_1$  – скорость реакции при температуре  $T_1$ ,  $V_2$  – скорость реакции при температуре  $T_2$ ,  $\gamma$  – температурный коэффициент скорости реакции Вант-Гоффа. При температуре  $T \sim 410$  °C достигается максимум интенсивности (00) рефлекса, что свидетельствует о полном удалении оксидного слоя, который более не рассеивает электронный пучок. Далее с повышением температуры интенсивность (00) рефлекса понижается из-за увеличения шероховатости поверхности, вследствие десорбции фосфора и сегрегации индия.

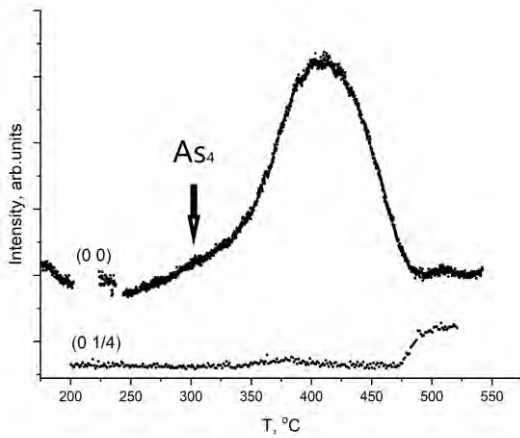


Рис. 1. Изменение интенсивности (00) и (0 1/4) рефлексов ДБЭО картины при отжиге InP в  $F_{As} = 6 \times 10^{-6}$  Torr

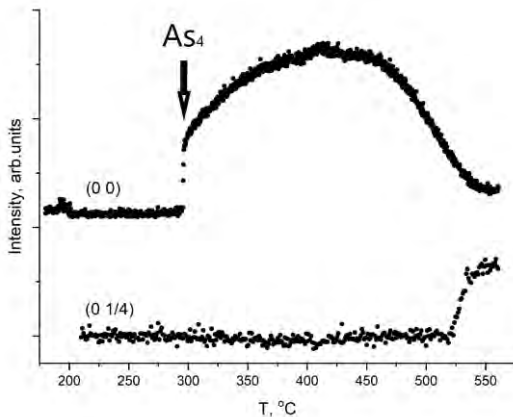


Рис. 2. Изменение интенсивности (00) и (0 1/4) рефлексов ДБЭО картины при отжиге InP в  $F_{As} = 2 \times 10^{-5}$  Torr

При подаче более интенсивного потока мышьяка ( $F_{As} = 2 \times 10^{-5}$  Torr) происходит резкое утонение слоя оксида Рисунок 2. Это очевидно связано с повышенным вкладом химических реакций мышьяка и оксида, который пропорционален концентрации

мышьяка. В результате этих реакций, однако, оксид не удаляется полностью и при дальнейшем нагреве происходит медленное утонение оксида. Характер этого процесса похож на характер удаления оксида при низких температурах в малом потоке мышьяка, то есть происходит термическое разложение оксида. Вероятно, оксидный слой состоит из оксидов двух типов, один из которых активно взаимодействует с мышьяком, а второй разлагается преимущественно термически. Последующее понижение интенсивности (00) рефлекса связано с увеличением шероховатости поверхности, но при большем потоке мышьяка оно происходит медленнее, поскольку поток мышьяка понижает десорбцию элементов V-группы с поверхности.

Отжиг подложки InP считается завершенным при появлении In-обогащенной структуры ( $4 \times 2$ ). Появление сверхструктурного (0 1/4) рефлекса позволяет определить температуру реконструкционного перехода ( $T_{rp}$ ), которая зависит от потока мышьяка. При  $F_{As} = 6 \times 10^{-6}$  Torr переход начинался при  $T_{rp} = 480$  °C Рисунок 1, при  $F_{As} = 2 \times 10^{-5}$  Torr -  $T_{rp} = 530$  °C Рисунок 2. Температуры появления (0 1/4) рефлекса и выхода на стационарное значение интенсивности (00) рефлекса совпадали.

В работе показано, что удаление оксидного слоя с поверхности *epi-ready* InP(001) подложек происходит за счет химического взаимодействия с мышьяком и термического разложения оксида. Мышьяк ускоряет процесс удаления оксида, однако для полного удаления оксида требуется термическое разложение. Основная часть оксидного слоя удаляется при температуре  $\sim 410$  °C. Отжиг при температурах выше 410 °C приводит к увеличению шероховатости поверхности из-за десорбции фосфора, которую можно замедлить, повышая поток мышьяка.

## Литература

1. M. Smit, K. Williams, Jos van der Tol // APL Photonics, V. 4, 050901 (2019).
2. K.S. Zhuravlev, A. L. Chizh, K. B. Mikitchuk et al. // J. Semicond, V. 43, 012302 (2022).
3. D.V. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, T.A. GavriloVA et al. // Surface Science, V. 710, 121861 (2021).
4. Д.В. Дмитриев, Д. . Колосовский, Е.В. едосенко, et al. // физика и техника полупроводников, Т. 55, №10, 877 (2021).



# Мультистабильность экситон-поляритонов в кирально-модулированном микрорезонаторе

О.А. Дмитриева<sup>1,2</sup>, Н.А. Гиппиус<sup>3</sup>, С. Г. Тиходеев<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991.

<sup>3</sup> Сколковский институт науки и технологии, ул. Нобеля, д. 3, Москва, 143026.

\*tikh@gpi.ru

В докладе теоретически исследована мультистабильность экситон-поляритонов в планарном полупроводниковом микрорезонаторе пониженной ( $C_4$ ) симметрии, с верхним зеркалом, представляющим собой фотонно-кристаллический слой с квадратной решеткой прямоугольных микропилларов, при резонансной линейно-поляризованной накачке по нормали к структуре.

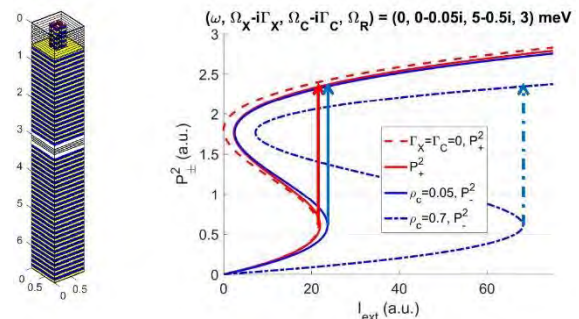
## Введение

Оптическая нелинейность экситон-поляритонов в планарных микрорезонаторах, связанная с синим сдвигом экситонной резонансной частоты с ростом плотности экситон-поляритонов, приводит к большому числу интересных эффектов бистабильности [1] и мультистабильности [2], см., например, в обзоре [3]. В настоящем докладе теоретически исследована мультистабильность экситон-поляритонов в планарном полупроводниковом микрорезонаторе пониженной симметрии  $C_4$  при резонансной накачке по нормали к структуре. Такой микрорезонатор может быть получен, например, путем изготовления на верхнем зеркале кирального фотонно-кристаллического слоя с квадратной решеткой прямоугольных микропилларов с симметрией  $C_4$ . Схематическое изображение одного периода рассматриваемого кирального микрорезонатора показано на левой панели Рис. 1, размеры на осях показаны в микронах.

## Мультистабильность в киральном микрорезонаторе

Ранее нами было показано [4], что спонтанная поляритонная фотолюминесценция микрорезонатора с пониженной симметрией может быть циркулярно-поляризованной, причем степень циркулярной поляризации  $\rho_{c,PL}$  может достигать близких к 100% значений в случае специально оптимизированных фотонно-кристаллических структур [5]. В настоящей работе показано, что даже слабое нарушение зеркальной симметричности микрорезонатора, при котором степень циркулярной поляризации спон-

танной фотолюминесценции микрорезонатора невелика,  $\rho_{c,PL} \sim 5\%$ , приводит к существенной модификации мультистабильных переходов в системе, например, к снятию вырождения между интенсивностями перехода с нижней ветви бистабильности на верхнюю для право и лево циркулярно поляризованных поляритонов при линейно-поляризованной резонансной накачке по нормали к структуре.



**Рис. 1.** Схематическое изображение одного периода кирального полупроводникового микрорезонатора с квадратной решеткой прямоугольных микропилларов с симметрией  $C_4$ , изготовленной на верхнем брэгговском зеркале (левая панель). Модификация S-образных зависимостей плотности лево и право циркулярно поляризованных экситон-поляритонов от интенсивности резонансной линейно-поляризованной накачки (правая панель, см. объяснение. обозначений в тексте)

На правой панели Рис. 1 штриховой красной линией показан S-образный контур зависимости плотности  $\sigma^+$  поляритонов от интенсивности линейно-поляризованной резонансной накачки по нормали к структуре в случае бесконечной добротности микрорезонаторной и экситонной мод,  $\Gamma_c=0$  и  $\Gamma_\chi=0$ ,

соответственно. Раби-частота микрорезонатора  $\Omega_R = 3 \text{ meV}$ , частоты экситонов  $\Omega_X$ , пустого микрорезонатора  $\Omega_C$  и накачки  $\omega$  совпадают. Сплошные красная и синяя линии показывают S-образные контуры для, соответственно,  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$  поляритонов при  $\Gamma_C=0.5 \text{ мэВ}$  и  $\Gamma_X=0.05 \text{ мэВ}$  и слабой киральности микрорезонатора,  $\rho_{c,PL} \sim 5\%$ . Штриховая синяя линия показывает S-образный контур для  $\sigma^-$  поляритонов при сильной киральности микрорезонатора,  $\rho_{c,PL} \sim 70\%$ . Красная (синяя) сплошная вертикальная стрелка показывает скачкообразный бистабильный переход  $\sigma^+$  поляритонов ( $\sigma^-$  поляритонов) с нижней на верхнюю устойчивую ветвь в случае слабой киральности микрорезонатора, штрих-пунктирная синяя стрелка показывает порог для  $\sigma^-$  поляритонов в случае сильно-киральной структуры. Поскольку нижняя устойчивая ветвь у  $\sigma^+$  поляритонов заканчивается при меньшей интенсивности резонансной накачки  $I_{ext}$ , чем у  $\sigma^-$  поляритонов, при таком переходе происходит скачкообразное увеличение степени циркулярной поляризации фотолюминесценции микрорезонатора до  $\rho_c \sim 60\%$  даже в случае слабой киральности микрорезонатора. Этот эффект, по-видимому, может объ-

яснить обнаруженное экспериментально [6] пороговое увеличение степени циркулярной поляризации фотолюминесценции слабо-кирального микрорезонатора с электрической накачкой при переходе в лазерный режим.

## Литература

1. N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev, V. D. Kulakovskii *et al.* // *Europhysics Letters*, V. 67, 997 (2004).
2. N.A. Gippius, I. A. Shelykh, D. D. Solnyshkov *et al.* // *Physical Review Letters*, V. 98, 236401 (2007).
3. С.С. Гаврилов // *Успехи физических наук*, т. 190, 137 (2020).
4. A. A. Maksimov, I. I. Tartakovskii, E. V. Filatov *et al.* // *Physical Review B*, V. 89, 045316 (2014).
5. S. V. Lobanov, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius *et al.* // *Physical Review B*, V. 92, 205309 (2015).
6. A. A. Maksimov, E. V. Filatov, I. I. Tartakovskii *et al.* // *Physical Review Applied*, *in press* (2022).

# Исследование спектральных характеристик 2.2 ТГц квантово-каскадного лазера с двухсекционным резонатором в зависимости от температуры и тока

А.К. Долгов<sup>1\*</sup>, Р.Р. Галиев<sup>1,2</sup>, С.С. Пушкарев<sup>1,2</sup>, А.А. Афоненко<sup>3</sup>, Д.В. Ушаков<sup>3</sup>,  
О.Ю. Волков<sup>4</sup>, В.В. Павловский<sup>4</sup>, И.Н. Дюжиков<sup>4</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, 220030, Минск, пр. Независимости, 4

<sup>4</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11

\*sereega.retorov@yandex.ru, \*\*khabibullin@isvch.ru

В работе представлены результаты исследования спектральных характеристик 2.2 ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) с резонатором Фабри-Перо, состоящим из двух оптически связанных секций – усиливающей и пассивной, разделенных воздушным зазором шириной 3 мкм. Активная область ТГц ККЛ основана на туннельно-связанных квантовых ямах (КЯ) GaAs/AlGaAs с содержанием алюминия в барьерных слоях 15%. Проведены исследования спектральных характеристик изготовленных двухсекционных ТГц ККЛ в зависимости от температуры и тока. Построены карты переходов от одномодового излучения к многомодовому в зависимости от тока накачки и температуры работы лазера. Переход «одномод-многомод» объясняется изменением лоренцевского контура уширения спектра усиления активной среды лазера при увеличении тока/температуры.

## Введение

Терагерцовое (ТГц) излучение позволяет исследовать структуру и энергетический спектр многих молекул (СО, ОН и др.) и атомов (ОИ и др.), имеющих возбужденные вращательные состояния. Например, вблизи 2 ТГц находятся линии поглощения таких соединений, как угарный газ (СО), оксид азота (NO до 2.7 ТГц), формальдегид (СН<sub>2</sub>О до 2.39 ТГц), включая его изотоп НDCO, и многих других веществ, актуальных для медико-биологических и экологических приложений. Задачу по определению малых концентраций данных веществ в газовой смеси позволяет решить ТГц спектроскопия высокого разрешения, где необходимы ТГц источники излучения с узкой шириной спектральной линии, а также достаточным уровнем выходной мощности и стабильностью частоты. ТГц квантово-каскадные лазеры (ТГц ККЛ) с высокой спектральной яркостью (порядка мВт на МГц) являются отличными кандидатами на эту роль.

Для использования ТГц ККЛ в спектроскопии в качестве источника необходимо обеспечить работу лазера в одномодовом режиме генерации с максимально возможной перестройкой частоты излучения. Целью работы является исследования спектральных характеристик 2.2 ТГц ККЛ с двухсекци-

онным резонатором, который позволяет осуществлять одномодовый режим генерации.

## Экспериментальные образцы

В работе представлены результаты исследования спектральных характеристик 2.24 ТГц ККЛ с активным модулем из 4 квантовых ям GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As. На основе гетероструктуры #723 были изготовлены ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом. Технология изготовления подробно описана в работах [1, 2].

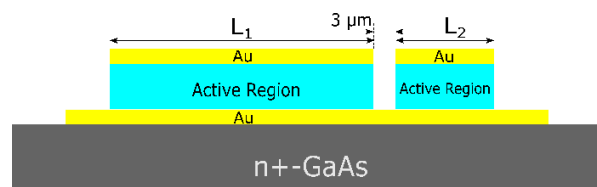


Рис. 1. Топология двухсекционного резонатора ТГц ККЛ с шириной полоска 100 мкм и общей длиной составного резонатора Фабри-Перо около 2 мм

На рис. 1 схематично приведена топология двухсекционных ТГц ККЛ с 3 мкм воздушным зазором (в измерительном криостате происходит откачка воздуха, поэтому между секциями будет вакуум), который разделяет активную секцию длиной  $L_1 = 1.8$  мм и пассивную секцию длиной  $L_2$  от 200 до 300 мкм.

Таким образом, общая длина составного резонатора Фабри-Перо составляла около 2 мм. Из изготовленных кристаллов были выколоты сформированные плазмохимическим травлением двухсекционные резонаторы, которые далее монтировались на теплоотводе. Активная секция лазеров была разварена золотой проволокой.

## Результаты и обсуждение

Исследование спектральных характеристик, изготовленных двухсекционных ТГц ККЛ проводилось методом Фурье-спектроскопии (Bruker Vertex 80v) в ИРЭ РАН. Были измерены спектры излучения во всем динамическом диапазоне токов генерации и диапазоне температур от 50 до 78 К. Обнаружено, что при изменении тока/температуры на спектрах генерации ТГц ККЛ наблюдается переход «одномод-многомод». Для иллюстрации данного эффекта на рис. 2 представлена карта переходов режимов генерации двухсекционного ТГц ККЛ, на которой видно, что одномодовая генерация существует в ограниченном диапазоне температур и токов.

Для объяснения наблюдаемого эффекта перехода «одномод-многомод» были рассчитаны спектры потерь и усиления двухсекционного ТГц ККЛ (см. Рис. 3). Пассивная секция резонатора приводит к модуляции потерь с амплитудой модуляции около  $1.3 \text{ cm}^{-1}$ , что обеспечивает селекцию продольных мод в резонаторе. Соприкосновение на графике контура усиления моды с уровнем потерь (условие равенства  $G = \alpha$ ) соответствует генерации данной моды излучения. Расчёты показали, что при увеличении уширения лоренцевского контура усиления  $\gamma$  с 1 до 2 мэВ резко сокращается количество касаний, обеспечивающих выполнение условия  $G = \alpha$ . Таким образом, переход «одномод-многомод» в двухсекционном ККЛ при изменении температуры/тока связан с уширением контура усиления активной среды.

В работе продемонстрирована одномодовая и многомодовая генерация ТГц ККЛ за счет использования двухсекционного резонатора, состоящего из активного резонатора/воздушного зазора/пассивного резонатора. На основе построенных карт режимов генерации обнаружено, что двухсекционные ТГц ККЛ крайне чувствительны к внешним факторам (температуре и току инжекции).

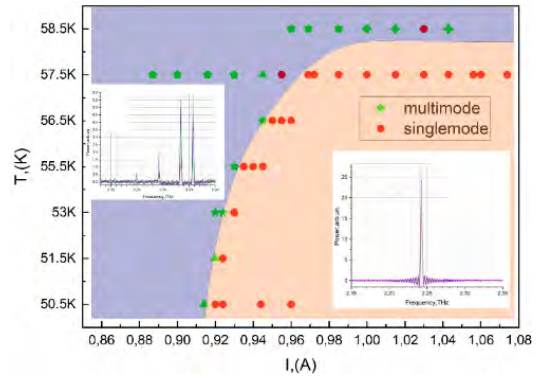


Рис. 2. Карта режимов работы двухсекционного ТГц ККЛ в диапазоне температур от 50.5 К до 58.5 К и токов от 0.860 А до 1.074 А. Темная область соответствует работе лазера в многомодовом режиме генерации, светлая область обозначает одномодовый режим генерации

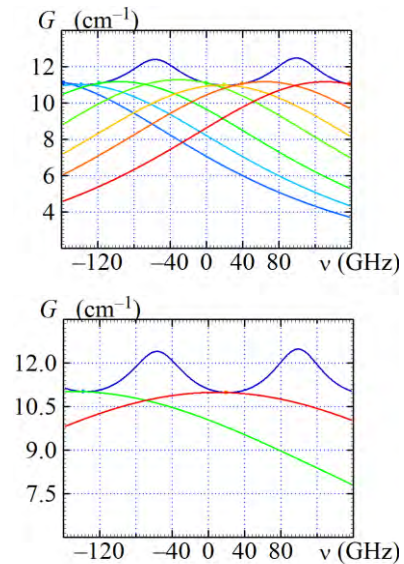


Рис. 3. Спектр потерь (синяя кривая) и семейство спектров усиления мод в двухсекционном резонаторе с лоренцевским контуром уширения  $\gamma = 1$  мэВ (верхний рисунок) и 2 мэВ (нижний рисунок). На рисунках представлены только те спектры усиления мод, которые соприкасаются с уровнем потерь в резонаторе, что соответствует условию генерации данных мод

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-72-30020.

## Литература

1. Хабибуллин Р.А. и др. // ФТП. Vol. 50, № 10. P. 1395–1400 (2016).
2. Хабибуллин Р.А. и др. // ФТП. Vol. 52, № 11. P. 1268–1273 (2018).

# Моделирование генерации электрон-дырочных пар для бета-вольтаических ячеек Ni63/Si

М.В. Дорохин<sup>1</sup>, М.В. Бастркова<sup>1</sup>, К.Р. Мухаматчин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603950, Россия.

\*mykamil@yandex.ru

В работе изучается бета-вольтаический элемент, состоящий из двух основных компонент – преобразователя, реализуемого на основе плёнки Si, и источника электронного излучения (бета-частиц) на основе радиоактивного изотопа Ni63. Моделирование генерации электрон-дырочных пар в структуре проведено с использованием метода Монте-Карло, где эффекты, связанные с поглощением энергии бета-излучения описываются в рамках аналитической формулы Бете. Показано, что данный подход хорошо согласуется с более точным, но требующим больших вычислительных мощностей расчётом по формуле Гривинского.

## Введение

Разработка полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур для бета-вольтаических элементов в настоящее время перспективное научное направление развития, находящееся на стыке современных нанопизики и альтернативной энергетике, позволяющее получить в перспективе миниатюрные, высоконадежные, безопасные и максимально длительно работающие (годами не требующие подзарядки) микромощные источники питания [1-2].

В работе рассмотрена генерация электрического тока в системе радиоактивная плёнка <sup>63</sup>Ni/Si в рамках метода Монте-Карло, где статистические величины разыгрываются с помощью случайных чисел  $\xi$ .

## Модель

Взаимодействие бета-частиц с веществом носит сложный характер и определяется, прежде всего, упругими и неупругими столкновениями с атомами среды, при этом сами атомы считаются неподвижными. В классическом приближении траектория электрона между двумя последовательными столкновениями представляет собой прямую линию. Согласно модели непрерывного замедления, которую мы будем использовать, электрон непрерывно теряет свою энергию вдоль траектории. При этом изменение направления движения частицы связано с упругим рассеянием на ядрах.

Поскольку полное сечение рассеяния содержит только упругое слагаемое  $\sigma_{el}$ , средняя длина свободного пробега имеет вид:

$$\lambda_{el}^{-1} = \frac{\rho N_{\alpha}}{\sum_{i=1}^n c_i M_i} \sum_{i=1}^n c_i \sigma_{eli}, \quad (1)$$

$\rho$  – плотность материала ( $г/см^3$ ),  $M_i$ ,  $\sigma_{eli}$  – полное сечение рассеяния и масса для  $i$ -го элемента,  $n$  – число элементов, образующих слой. Таким образом, путь, проходимый электроном по прямой линии, равен

$$l = -\lambda_{el} \ln \xi. \quad (2)$$

Полное сечение упругого рассеяния (в  $см^2$ ), согласно Мотту, вычисляется для каждого элемента по формуле [3]

$$\sigma_M^T = 5.21 \times 10^{-21} \frac{Z^2}{E^2} \frac{4\pi\lambda(1 - e^{-\beta\sqrt{E}})}{\alpha(1 + \alpha)} \left[ \frac{E + 511}{E + 1022} \right]^2, \quad (3)$$

$Z$  – атомный номер,  $E$  – кинетическая энергия электрона (кэВ). Коэффициенты  $\lambda$  и  $\beta$  для каждого  $Z$  приведены в работе [3].

В случае многокомпонентной структуры для определения элемента  $j$ , ответственного за рассеяние, необходимо составить кумулятивную функцию вида

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^j c_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^n c_i \sigma_i}, \quad j=1, \dots, n, \quad (4)$$

$\sigma_i$  – сечение рассеяния для  $i$ -го элемента. Соответствующий  $j$ -й механизм должен удовлетворять равенству  $F_{j-1} < \xi < F_j$ .

Определив таким образом коэффициент  $\alpha_j$ , мы можем найти полярный угол:

$$\cos \theta = 1 - \frac{2\alpha_j \xi_1}{2 + \alpha_j - \xi_1}. \quad (5)$$



Азимутальный угол  $\varphi$  равномерно распределён на отрезке от 0 до  $2\pi$ :

$$\varphi = 2\pi\zeta_2. \quad (6)$$

Здесь  $\theta$  и  $\varphi$  выбираем относительно системы отсчета, где предыдущее направление движения электрона совпадает с направлением оси  $Oz$ . Чтобы получить угол, определяющий направление движения бета-частицы после рассеяния в лабораторной системе, воспользуемся формулой

$$a_z = a_{z0} \cos \theta - \sqrt{1 - a_{z0}^2} \sin \theta. \quad (7)$$

С помощью (8) мы найдём координаты следующего столкновения  $z = z + a_z l$ .

Неупругие процессы, представляющие собой взаимодействие между падающей частицей и электронной оболочкой атома вещества, будем описывать соотношением Бете [4]:

$$\frac{dE}{ds} = - \frac{7.85 \times 10^{-3} \rho}{\sum_{i=1}^n c_i M_i} \sum_{i=1}^n c_i Z_i \ln \left( 116 \frac{10^3 E + k_i J_i}{J_i} \right), \quad (8)$$

где  $Z_i$  – атомный номер  $i$ -го элемента,  $E$  – средняя энергия электрона на пути  $ds$  (нм) в кэВ, коэффициент  $k_i$  определён следующим образом:

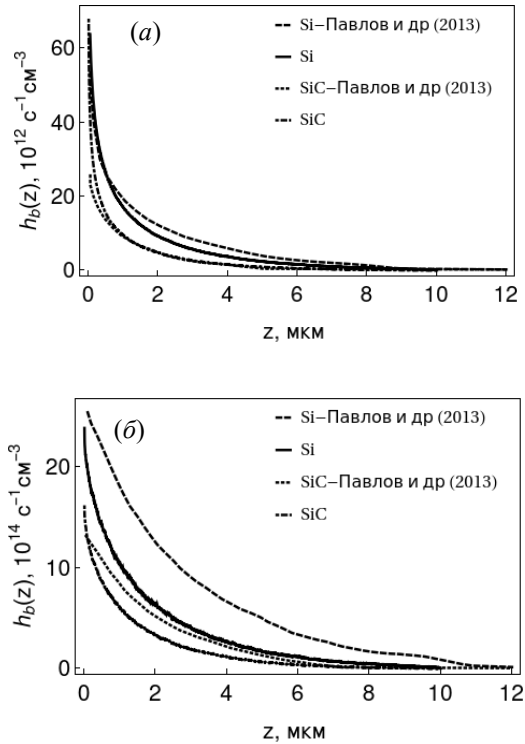
$$k_i = 0.734 Z_i^{0.037}. \quad (9)$$

Средний потенциал ионизации атома задаётся формулой:

$$J = \begin{cases} 11.5Z(\vartheta B), & Z < 13 \\ 9.76 + 58.5Z^{-0.19}(\vartheta B), & Z \geq 13 \end{cases} \quad (10)$$

Потери энергии (8) включают в себя затраты на возбуждение плазмонов, фононов, ионизацию внутренних оболочек атомов, тормозное рентгеновское излучение и на возбуждение электронов проводимости.

В качестве примера приведён расчёт скорости генерации электронно-дырочных пар в плёнке Si при двух толщинах радиоактивного источника  $^{63}\text{Ni}$  – 10 нм и 3 мкм (см рис.1) и приведено сравнение с данными работы [5]. Отличия для толстой плёнки связаны с тем, что в [5] в области энергии, сравнимой с энергией связи электронов в атоме (в области энергий ниже ионизационного потенциала) неупругие процессы были учтены в дискретном приближении (подход Гризинского [6]).



**Рис. 1.** Расчёт скорости генерации электронно-дырочных пар бета-электронами  $h_b$  от глубины  $z$  в Si и SiC. Расчёт для слоя Ni толщиной 10 нм (а) и 3 мкм (б) при средней скорости бета-распада в плёнке Ni  $3.7 \times 10^{12} \text{ c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ . На рисунке приведено сравнение с результатами, полученными в работе [5] с учётом поглощения по формулам Гризинского и Моллера (оцифровка)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-03-2020-191/5).

### Литература

1. Prelas M.A., Weaver C.L., Watermann M.L. et al. // Prog. Nucl. Energy, V. 23, 117 (2014).
2. Revankar S.T., Adams T.E. // J. Energy Power Sources, V. 1, 321 (2014)
3. R. Gauvin, D. Drouin, // SCANNING, V. 15, 140 (1993).
4. D.C. Joy, S. Lou // SCANNING, V. 11, 176 (1989).
5. В.Н. Павлов, В.Я. Панченко, М.А. Поликарпов и др., // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 46 (2013).
6. M. Gryzinsky // Phys. Rev., V. 138, 322 (1965).

# Люминесцентные свойства наноструктурированного объемного кремния

М.В. Дорохин<sup>1</sup>, М.В. Веды<sup>1</sup>, Н.В. Дикарева<sup>1,\*</sup>, П.Б. Демина<sup>1</sup>, Д.А. Здоровейцев<sup>1</sup>, М.С. Болдин<sup>1</sup>, А.В. Воронин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603022.

\*dnat@ro.ru

Представлены результаты исследования излучательных свойств наноструктурированного объемного кремния. Показана принципиальная возможность получения сравнительно интенсивной фотолюминесценции непрямозонного материала путем формирования фазы наноструктурированного кремния методом электроимпульсного плазменного спекания. Предположительно наблюдаемая в эксперименте люминесценция связана с эффектом размерного квантования.

В настоящее время одним из самых экономически выгодных способов решения проблемы дальнейшего наращивания производительности современных вычислительных устройств является создание приемников и генераторов излучения на основе кремниевой технологии. Однако, сдерживающим моментом в данном подходе является низкий выход люминесценции кремния, причиной которого является его непрямозонность. Из-за непрямых межзонных переходов Si довольно долго многими исследователями считался бесперспективным материалом для создания светодиодов с межзонным спектром излучения. Позднее эти представления были опровергнуты [1, 2]. Подходы, рассмотренные в [1, 2], составляют основу современных технологических решений (хорошо совместимых с технологией интегральных схем) по созданию кремниевых излучателей, эти решения связаны с наноструктурированием материала. Известно, что уменьшение кремниевой частицы до нанометрового размера приводит к существенной модуляции, квантованию зонной структуры, которая, в конечном итоге, сводится к появлению возможности прямых межзонных переходов. Однако, несмотря на хорошо известную физику эффектов наноструктурирования, в мировой литературе известно довольно мало методов создания образцов с фазой наноразмерного кремния, что вызывает необходимость проведения дальнейших исследований, как в области поиска возможных экономически и технологически выгодных способов модификации зонной структуры кремния, так и в области исследования его оптоэлектронных свойств.

В настоящей работе представлены результаты исследования излучательных свойств наноструктури-

рованного объемного кремния, полученного методом электроимпульсного плазменного спекания.

## Методика эксперимента

Процесс изготовления материала проводился в два этапа. На первом этапе происходило формирование нанопорошка кремния с размером частиц порядка 30 нм. Второй этап — собственно процесс электроимпульсного плазменного спекания полученного на предыдущем этапе нанопорошка. Спекание проводилось при давлении 70 МПа. Исследовались два типа образцов. Образцы 1го типа изготавливались на основе нанопорошка Si с примесью бора (1 ат. %), образцы 2го типа изготавливались на основе нанопорошка Si с примесью фосфора (1 ат. %). Спекание обоих типов порошков проводилось в трех режимах, в результате были получены три группы образцов:

А — полученные при максимальной температуре спекания  $T_{\text{сп}} = 1100^{\circ}\text{C}$  с дополнительной выдержкой при максимальной температуре в течении 30 минут, В — при  $T_{\text{сп}} = 1100^{\circ}\text{C}$  без дополнительной выдержки, С — при  $T_{\text{сп}} = 950^{\circ}\text{C}$  также без дополнительной выдержки. Скорость спекания во всех случаях составляла  $50^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , давление пресса — 70 МПа. Исследования излучающих свойств полученных наноструктурированных образцов кремния проводились методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) при 300 К и при 77 К.

## Результаты и обсуждение

Исследование спектров фотолюминесценции (рисунки 1) всех образцов 1го типа показало наличие излучения с максимумом на длинах волн 0.95 мкм

для образца А и 0,93 мкм для образцов В и С, соответственно. При этом отмечается уменьшение интенсивности люминесценции при увеличении температуры спекания или времени отжига образцов. Увеличение температуры спекания привело почти к трехкратному уменьшению интенсивности сигнала ФЛ, тогда как увеличение времени отжига привело к уменьшению интенсивности в 2 раза. Аналогичный эффект наблюдался в случае измерений при температуре 77К, при этом зарегистрировано смещение пика ФЛ в область меньших длин волн и снижение интенсивности ФЛ в 5 раз по сравнению со случаем 300 К (рисунок 2). Отметим, что снижение интенсивности при пониженной температуре свидетельствует о значительной роли фононов в рекомбинационных переходах.

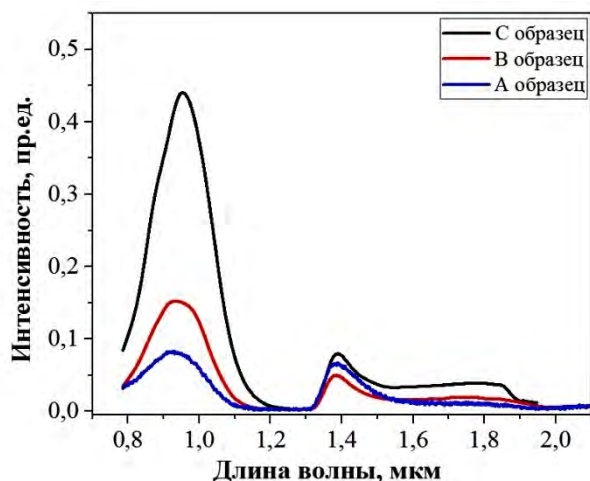


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции образцов кремния, полученных на основе нанопорошка 1го типа

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность получения фотолюминесценции сравнительно высокой интенсивности в наноструктурированном кремнии, полученным методом электроимпульсного плазменного спекания. При этом полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о значительной роли непрямых оптических переходов для кремния, структурированного из наночастиц с размерами 30 нм.

Ожидается, что уменьшение размера частиц за счёт, например, окисления, позволит снизить вклад непрямых переходов и существенно усилить люминесценцию материала.

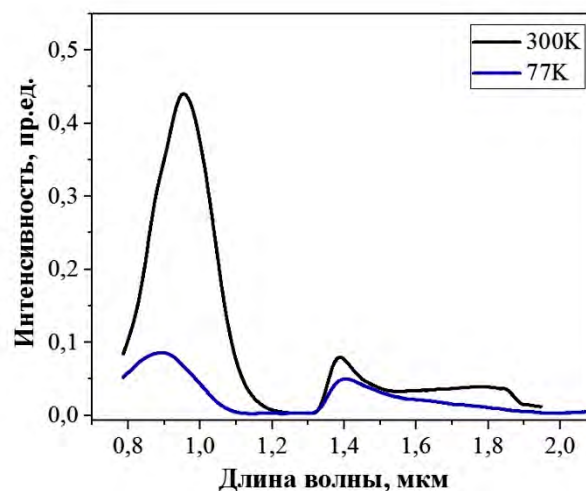


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образца С, измеренного при температурах 77 К и 300 К

Спектры фотолюминесценции образцов 2го типа подобны показанным на рисунке 1, следовательно, введение донорной или акцепторной примеси не приводит к появлению каких-либо дополнительных рекомбинационных уровней. Как и в случае с образцами первого типа, дополнительный отжиг привел к уменьшению интенсивности сигнала фотолюминесценции.

Работа выполнена госзаданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-03-2020-191/5).

## Литература

1. M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal. Nature 412, 805 (2001).
2. Wai Lek Ng, M.A. Lourenco, R.M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, K.P. Homewood. Nature 410, 192 (2001).

# Генерация разностной частоты в области «остаточных лучей» GaAs в двухчастотных диодных лазерах

А.А. Дубинов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*sanya@ipmras.ru

Предложено две схемы диодного лазера на основе GaAs: двухчиповая конструкция и схема с двумя разными квантовыми ямами для одновременной двухчастотной генерации в ближнем ИК диапазоне. Рассмотрена возможность эффективной генерации разностной частоты (ГРЧ) в области «остаточных лучей» GaAs в предложенных лазерах. Достаточная эффективность ГРЧ достигается за счет использования резонансного увеличения нелинейной восприимчивости второго порядка в (Al)GaAs в этом частотном интервале. Показано, что в подобных лазерах выходная эффективность преобразования по мощности для РЧ в диапазоне 7.5 – 8 ТГц может достигать 8 МВт<sup>-1</sup> при комнатной температуре.

## Введение

В настоящее время востребованы компактные источники терагерцового (ТГц) излучения для многих приложений, в первую очередь для спектроскопии и мониторинга окружающей среды. В части ТГц диапазона частот лидирующее место среди таких источников занимают квантовые каскадные лазеры (ККЛ). Однако существует диапазон частот (6 – 10 ТГц), где работа ККЛ затруднена из-за сильного поглощения на полярно-оптических фононах полупроводников, на основе которых ККЛ созданы.

Альтернативным компактным источником излучения ТГц диапазона может быть двухчастотный лазер, в котором за счет нелинейных процессов смещения лазерных мод с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  происходит генерация моды на РЧ  $\omega = \omega_2 - \omega_1$ . Природа решеточной нелинейной восприимчивости второго порядка полярных полупроводников  $A_3B_5$  – ангармоничность оптических колебаний, поэтому имеется резонанс нелинейной восприимчивости при воздействии двух волн (с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) и разницей частот, лежащей в окрестности частоты поперечного оптического фонона. В максимуме величина нелинейной восприимчивости GaAs в 60 раз больше величины восприимчивости на больших частотах. Т.е. то, что мешает генерации излучения в ККЛ на основе GaAs в диапазоне частот 6 – 10 ТГц, может помочь ГРЧ в этом диапазоне частот.

## ГРЧ в двухчиповом диодном лазере

Для ГРЧ предлагается использовать конструкцию двухчипового лазера с составным резонатором, состоящего из расположенных на одном теплоот-

воде в непосредственной близости друг от друга двух одночастотных лазеров с квантовыми ямами, генерирующих в непрерывном режиме две частоты ближнего ИК диапазона (см. Рис. 1) [1]. В предлагаемой схеме оба лазера должны генерировать на TE<sub>0</sub> моде, и излучение более длинноволнового лазера будет вводиться в волновод более коротковолнового лазера (по нормали поперечной грани волновода). В этом лазере и будет происходить ГРЧ, равной разнице частот генерации этих лазеров. Предполагается, что лазерная структура, в котором будет происходить ГРЧ, выращена на плоскости (001), а моды ближнего ИК диапазона распространяются вдоль направления [110], поэтому нелинейная поляризация в GaAs перпендикулярна плоскости слоев и возбуждает на РЧ только ТМ моду [1].

В расчетах использовались следующие параметры лазера, в котором предполагается наблюдать ГРЧ: на  $n^+$ -GaAs подложке ( $10^{18}$  см<sup>-3</sup>) последовательно расположены:  $n^+$  - InGaP ограничивающий слой ( $5.7 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, 0.8 мкм), слой GaAs (0.8 мкм) с квантовой ямой (КЯ), генерирующей излучение с длиной волны  $\lambda \sim 1$  мкм,  $p^+$  - InGaP ограничивающий слой ( $4.5 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, 0.8 мкм), контактный слой  $p^+$  - GaAs ( $5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, 0.2 мкм) и металлический контакт (Au).

Расчет мощности РЧ для предложенной структуры, при мощности генерации мод ближнего ИК диапазона 1 Вт в лазере с шириной волновода 100 мкм показывает, что максимум мощности на РЧ достигается вблизи максимума нелинейной восприимчивости GaAs и длины когерентности и равен  $\sim 0.4$  мкВт, что соответствует эффективности преобразо-

вания  $\eta = 0.4 \text{ МВт}^{-1}$  [1], где  $\eta = P/(P_1 \times P_2)$ ,  $P$  – мощность излучения на РЧ,  $P_j$  – мощности излучения на частотах  $\omega_j$ .

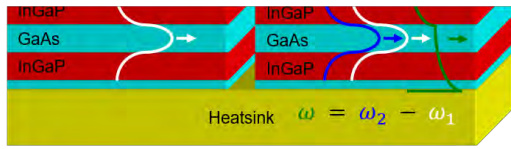


Рис. 1. Конструкция двухчастотного лазера с составным резонатором

## ГРЧ в двухчастотном диодном лазере с разной поляризацией мод

Предложена схема, позволяющая осуществить одновременную генерацию двух частот в полупроводниковом лазере. Для того чтобы избежать поглощения наиболее коротковолнового излучения в КЯ, генерирующей длинноволновое излучение, предлагается использовать моды с разными поляризациями:  $TE_0$  и  $TM_0$ . У  $TM$  моды две компоненты электрического поля: одна направлена вдоль направления распространения, другая – перпендикулярно плоскости роста КЯ. Расположив КЯ, генерирующую частоту  $\omega_1$  в узле компоненты электрического поля  $TM_0$  моды, направленной вдоль распространения волны, на частоте  $\omega_2$  можно подавить поглощение этой компоненты, что позволит осуществить стабильную двухчастотную генерацию в предложенном лазере. Другая компонента электрического поля в  $TM$  моде на частоте  $\omega_2$  практически не поглощается в КЯ, генерирующей  $\omega_1$ . Интеграл перекрытия этой компоненты с электрическим полем  $TE$  моды на частоте  $\omega_1$  близок к 1, что должно обеспечить эффективность ГРЧ. Согласно правилам отбора, поляризация мод определяется типом верхней дырочной подзоны в КЯ, генерирующей данную моду. КЯ с верхней подзоной тяжелых дырок генерирует  $TE$  моду, а КЯ с верхней подзоной легких дырок генерирует преимущественно  $TM$  моду. Управлять типом верхней дырочной подзоны можно с помощью деформации КЯ в плоскости роста. Если КЯ растянута в плоскости роста, то при не очень малых её толщинах верхняя дырочная подзона будет образована состояниями легких дырок. Если КЯ не деформирована или сжата в плоскости роста, тогда верхняя дырочная подзона будет сформирована состояниями тяжелых

дырок. Предлагается использовать недеформированную КЯ  $Al_{0.08}Ga_{0.92}As$  для генерации  $TE_0$  моды на частоте  $\omega_1$  ( $\lambda_1 \sim 808 \text{ нм}$ ) и растянутую КЯ  $GaAsP$  для генерации  $TM_0$  моды на частоте  $\omega_2$  ( $\lambda_2 \sim 791 \text{ нм}$ ).

Рассматривается следующая конструкция лазера: на  $n^+$ - $GaAs$  подложке ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) последовательно расположены:  $n^+$ - $Al_{0.75}Ga_{0.25}As$  ограничивающий слой ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , 2 мкм), слой  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$  (0.6 мкм) с 2 разными КЯ,  $p^+$ - $Al_{0.75}Ga_{0.25}As$  ограничивающий слой ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , 2 мкм), контактный слой  $p^+$ - $GaAs$  ( $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , 0.2 мкм) и металлический контакт ( $Au$ ).

В случае, когда структура лазера, выращена на плоскости (001), а моды ближнего ИК диапазона распространяются вдоль направления [110], нелинейная поляризация в  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$  имеет практически только продольную компоненту относительно плоскости слоев, и возбуждает на РЧ  $TE$  моду.

Расчет мощности РЧ для предложенного лазера, при мощности генерации мод ближнего ИК диапазона 1 Вт в лазере с шириной волновода 100 мкм показывает, что максимум мощности на РЧ достигается вблизи максимума нелинейной восприимчивости  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$  и длины когерентности и равен  $\sim 8 \text{ мкВт}$ , что соответствует  $\eta = 8 \text{ МВт}^{-1}$  [2]. Отметим, что мощность лазеров на основе  $AlGaAs$  с шириной волновода 100 мкм на  $\lambda \sim 800 \text{ нм}$  достигает 8 и 100 Вт при непрерывной и импульсной накачке, соответственно. Следовательно, в предположении, что эта мощность в двухчастотном  $AlGaAs$  лазере будет делиться пополам между двумя частотами ближнего ИК диапазона, выходящая мощность на РЧ в районе 7.5 – 8 ТГц может достигать 0.13 и 20 мВт при непрерывной и импульсной накачке, соответственно.

Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «Базис» (№ 19-1-2-12-1).

## Литература

1. A.A. Dubinov, V.V. Utochkin. // Journal of Applied Physics, V. 128, 053104 (2020).
2. A.A. Dubinov, V.V. Utochkin and A.A. Razova. // Applied Optics, V. 60, 4404 (2021).



# Моделирование вертикально излучающего терагерцового HgTe/CdHgTe лазера

А.А. Дубинов<sup>1,\*</sup>, В.Я. Алешкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*sanya@ipmras.ru

Предложен оригинальный дизайн терагерцового (ТГц) вертикально излучающего лазера (ВИЛ) на основе гетероструктуры с десятью 4.7 нм квантовыми ямами (КЯ) HgTe/Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te, выращенной на [013] GaAs подложке. Был проведен расчет его характеристик и было показано, что добротность резонатора ВИЛ на частоте 12.9 ТГц (длина волны 23.25 мкм) составляет 248, что достаточно для возникновения лазерной генерации на этой частоте при температуре  $T = 20$  К при концентрации неравновесных носителей  $1.4 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Оценка пороговой интенсивности накачки излучением CO<sub>2</sub> лазера дает значение в 1 Вт/см<sup>2</sup>, что достижимо для непрерывной работы лазера накачки.

## Введение

В настоящее время крайне востребованы источники когерентного излучения ТГц диапазона для различных применений в спектроскопии газов, медицине, мониторинге окружающей среды. В этой области длин волн лидирующее место среди полупроводниковых источников излучения занимают монополярные квантовые каскадные лазеры (ККЛ) на основе соединений A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>. Однако существует диапазон частот (5 – 15 ТГц), где работа ККЛ на основе упомянутых выше соединений затруднена, а зачастую невозможна из-за сильного поглощения на полярно-оптических фонах (ПОФ) [1].

Альтернативой материалам A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> могут послужить материалы, в которых частоты ПОФ располагаются далеко от рассматриваемой выше области частот. В частности, такими материалами могут служить твердые растворы HgCdTe, имеющие частоты ПОФ в районе 4 ТГц, а ширину запрещенной зоны HgCdTe можно менять в широких пределах от нуля до 1.6 эВ за счет изменения доли Cd. Недавно удалось наблюдать из планарных волноводных структур HgCdTe с 15 КЯ суперлюминесценцию на частоте 9.7 ТГц [2]. Трудность в наблюдении лазерной генерации из подобных структур связана с невозможностью создания зеркал в резонаторе путем скалывания полупроводниковой пластины. Дело в том, что необходимые сколы в кристаллах типа цинковой обманки получаются только поперек направлений [110] и [1-10]. Но качественный и быстрый рост HgCdTe структур осуществляется только на подложках [013] GaAs [3]. Кроме того, приходится выращивать достаточно толстую (~ 15 – 20 мкм) волноводную структуру из-за большой длины волны излучения, малого контраста показате-

телей преломления буферного (играющего роль ограничивающего) слоя CdTe и волноводного слоя Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te, а также из-за большего показателя преломления GaAs подложки по сравнению с показателями преломления CdTe и Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te.

Для преодоления указанных выше проблем в настоящей работе предлагается воспользоваться схемой ВИЛ. Отметим, что ранее уже предлагали подобную схему с использованием в качестве зеркал диэлектрических распределенных брегговских отражателей (РБО) для лазеров на основе HgCdTe среднего ИК диапазона [4]. Однако использование РБО для ТГц лазеров затруднительно, т.к. для обеспечения высокого коэффициента отражения таких зеркал необходимы несколько десятков слоев толщиной  $\lambda/4n$ , где  $\lambda$  - длина волны,  $n$  - показатель преломления слоя. Для  $\lambda \sim 20$  мкм оценка общей толщины структуры с двумя подобными зеркалами дает величину в несколько десятков мкм, что практически неосуществимо. Поэтому в данной работе проводится моделирование ВИЛ, в котором в качестве зеркал предлагается использовать достаточно тонкие металлический слой и слой сильнолегированного полупроводника.

## Моделирование

Предлагается на утоненной полуизолирующей подложке GaAs (013) толщиной 100 мкм вырастить последовательно легированный донорами слой  $n^+$  - GaAs толщиной 4 мкм и с концентрацией электронов  $4 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Затем требуется вырастить буферный слой CdTe толщиной 5 мкм, необходимый для дальнейшего роста качественных слоев Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te с квантовыми ямами [3]. На буферном слое будет располагаться слой Hg<sub>0.3</sub>Cd<sub>0.7</sub>Te с толщиной, опти-

мизированной для достижения высокой добротности вертикального резонатора. 10 КЯ HgTe толщиной 4.7 нм каждая, разделенных 30 нм барьером  $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ , должны располагаться в пучности электрического поля вертикальной электромагнитной моды. Слои  $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$  обычно защищаются покровным слоем CdTe толщиной 50 нм, поверх которого необходимо нанести слой Au с достаточной для полного отражения толщиной. Предполагается, что накачка КЯ излучением внешнего лазера будет осуществляться через прозрачную для этого излучения подложку под некоторым углом к поверхности. Одним из зеркал рассматриваемого ВИЛ будет служить слой Au, который в ТГц диапазоне имеет почти 100% коэффициент отражения. Второе зеркало должно пропускать небольшую долю генерируемого излучения, поэтому в ТГц диапазоне на эту роль подходит слой сильнолегированного полупроводника ( $n^+$  - GaAs), диэлектрическую проницаемость которого можно контролировать концентрацией примеси [5]. Отметим, что для излучения накачки (средний ИК диапазон) этот слой будет практически прозрачным.

Для численного расчета спектра комплексных частот  $\omega_q$ , распределения электрического поля и добротности  $Q$  в модах рассматриваемого ВИЛ был использован метод матриц переноса. Толщины слоев  $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$  до и после КЯ HgTe выбирались таким образом, чтобы обеспечить максимальную  $Q = |\text{Re}(\omega_q)/\text{Im}(\omega_q)| = 248$ . Величины этих толщин всего лишь 0.45 и 1.55 мкм, соответственно. Следовательно, такая конструкция резонатора существенно уменьшает необходимые толщины эпитаксиальных слоев по сравнению с планарным диэлектрическим волноводом [2].

Для того чтобы вычислить порог генерации такого ВИЛ, было вычислены электронный спектр, волновые функции и коэффициент усиления в 4.7 нм HgTe КЯ при  $T = 20$  К, при которой наблюдалась суперлюминесценция [2]. Для расчета этих величин использовалась модель Кейна с учетом деформационных эффектов. Для простоты пренебрегалось понижением симметрии структуры на гетерограницах и отсутствием центра инверсии, что приводило к двукратному вырождению электронного спектра. Детали расчета можно найти в работе [6].

Можно показать, что порог генерации предлагаемого ВИЛ достигается только при концентрации неравновесных носителей в КЯ  $1.4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , что связано с необходимостью преодоления потерь на поглощение излучения в резонаторе лазера и выхода из него. Для такой концентрации носителей в подобных КЯ подавляющим механизмом рекомбинации является оже-рекомбинация [7].

Оценка пороговой интенсивности накачки излучением  $\text{CO}_2$  лазера ( $\lambda \sim 10.2$  мкм) дает значение  $1 \text{ Вт/см}^2$ , что достижимо для непрерывной работы лазера накачки. Отметим также, что увеличение числа КЯ в 2-3 раза в несколько раз снизит порог генерации, а, значит и позволит увеличить температуру, при которой она возможна. При этом общая толщина эпитаксиальных слоев практически не изменится.

Кроме того, конструкция ВИЛ позволяет, в отличие от резонатора с латеральным волноводом, получать более узкую и симметричную диаграмму направленности генерируемого излучения.

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

## Литература

1. M.S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, P. De Natale. // *Optics Express*, V. 23, 5167 (2015).
2. S.V. Morozov, V.V. Romyantsev, M.S. Zholudev *et al.* // *ACS Photonics*, V. 8, 3526 (2021).
3. S. Dvoretzky *et al.* // *Journal of Electronic Materials*, V. 39, 918 (2010).
4. I. Vurgaftman, J.R. Meyer, J.M. Dell *et al.* // *Journal of Applied Physics*, V. 83, 4286 (1998).
5. J.S. Blackmore // *Journal of Applied Physics*, V. 53, R123 (1982).
6. V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov *et al.* // *Journal of Physics: Condensed Matter*, V. 30, 495301 (2018).
7. V.Ya. Aleshkin, V.V. Romyantsev *et al.* // *Journal of Applied Physics*, V. 129, 133106 (2021).

# Исследование упругих деформаций в конических нанопроводах

М.С. Дунаевский<sup>1,\*</sup>, П.А. Алексеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

Рассмотрены упругие деформации в конических нанопроводах. Получено аналитическое выражение для распределения упругих деформаций по длине конического нанопровода. Обнаружено, что при определенных углах конусности в нанопроводах возникает протяжённая область достаточно высоких деформаций, сопоставимых или даже больших, чем деформация у основания.

## Введение

В последние годы большой интерес вызывает изучение воздействия механических деформаций на оптические и транспортные свойства полупроводниковых наноструктур. При изгибах полупроводниковых нанопроводов (НП) в них могут наблюдаться значительные упругие деформации (до 11% [1]), при этом сами нанопровода не ломаются. Такое поведение при изгибах существенным образом отличается от изгибов объёмных материалов, в которых разрушение происходит уже при деформации около 1%. Вторая важная особенность тонких нанопроводов заключается в том, что сила, необходимая для их существенного изгиба, достаточно мала и может составлять лишь несколько наноньютонов. В недавней работе [2] было продемонстрировано, что изгиб  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x=0.85$ ) нанопроводов СЗМ-зондом может приводить к увеличению проводимости на несколько порядков. Это открывает возможность создания чувствительных сенсоров и переключателей на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  нанопроводов. Следует отметить, что при изгибе цилиндрических  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  нанопроводов СЗМ-зондом в упруго деформируемом слое возникает область с повышенной проводимостью [2], что обусловлено сдвигом положения дна зоны проводимости. В случае изгиба цилиндрических нанопроводов значение осевых упругих деформаций  $\epsilon_{xx}$  максимально у основания нанопровода и линейно уменьшается  $\epsilon_{xx} \sim (1-x)$  до нуля в точке приложения силы ( $x=1$ ). Такое уменьшение деформаций приводит к тому, что при недостаточно высоких концентрациях индия в цилиндрических  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  нанопроводах может не происходить переключение проводимости. В этой работе выполнен поиск оптимальной формы для управления распределением упругих деформаций в

нанопроводах для повышения эффективности переключения проводимости.

## Результаты

На рисунке 1 представлено типичное СЗМ-изображение конических нанопроводов (см. Рис. 1b) и схема изгиба нанопроводов СЗМ-зондом (см. Рис. 1a). Следует отметить, что в ряде работ [2,3,4] были выполнены эксперименты по контролируемому изгибу цилиндрических нанопроводов с помощью СЗМ-зонда. В данной работе мы в рамках теории упругости исследуем распределение осевых упругих деформаций по длине изогнутого конического нанопровода.

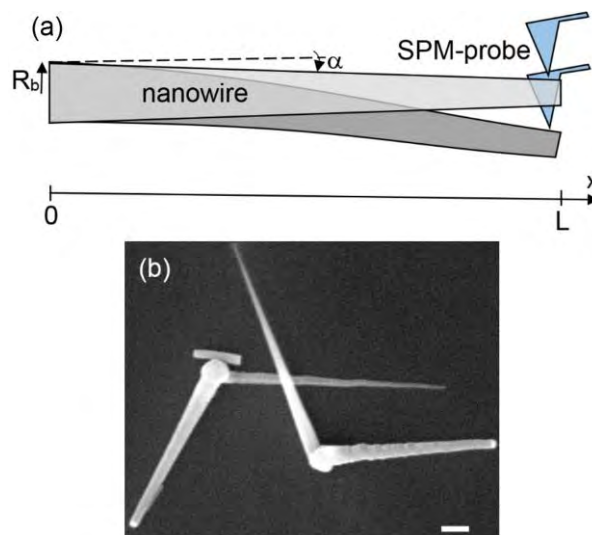


Рис. 1. (a) - Схема изгиба конического нанопровода; (b) – СЗМ изображение конических нанопроводов

Уравнение Эйлера-Бернулли (1) совместно с граничными условиями (2) позволяет определить рас-

пределение  $w(x)$  изгибов и осевых деформаций  $\varepsilon_{xx}(x)$  по длине изгибаемого конического НП.

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI(x) \frac{d^2 w(x)}{dx^2}) = 0 \quad (1)$$

$$w|_{x=0} = w'|_{x=0} = w''|_{x=L} = 0 \quad w'''|_{x=L} = \frac{-F}{EI(L)} \quad (2)$$

Здесь  $E$  — модуль Юнга нанопровода,  $I(x)$  — момент инерции конического НП,  $L$  — длина НП. Для конического НП с углом коничности  $\alpha$  и радиусом основания  $R_b$  можно получить следующее дифференциальное уравнение второго порядка:

$$E \frac{\pi R_b^4}{4} \left(1 + \frac{\alpha}{R_b} x\right)^4 \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = F(L - x) \quad (3)$$

Значения осевых деформаций  $\varepsilon_{xx}$  внутри нанопровода линейно возрастают от центра к краям. Вблизи центра значение деформации  $\varepsilon_{xx}$  равно нулю, а по краям нанопровода деформации имеют разные знаки (одна сторона НП сжата, а другая растянута) и достигают максимальных значений  $\varepsilon_{xx,max}$ :

$$\varepsilon_{xx,max}(x) = \pm \frac{R(x)}{\rho(x)} \quad (4)$$

Здесь  $\rho(x)$  — радиус кривизны изогнутого нанопровода в точке  $x$ . Используя формулы (3) и (4), а также вводя безразмерную координату  $\xi = x/L$ , деформацию в основании НП  $\varepsilon_b = (F/E)(4/\pi R_b^3)L$  и приведенный параметр конусности  $a = \alpha L/R_b$ , получаем выражение для  $\varepsilon_{xx,max}$

$$\varepsilon_{xx,max}(\xi) = \varepsilon_b \frac{1 - \xi}{(1 + a\xi)^3} \quad (5)$$

На рисунке 2 представлены расчетные профили значений нормированных деформаций  $\varepsilon(\xi)/\varepsilon_b$  для конических нанопроводов с коэффициентом конусности  $a=0$  (черная кривая),  $a=-0.3$  (красная кривая),  $a=-0.5$  (синяя кривая),  $a=-0.7$  (зеленая кривая). Видно, что при достаточно сильной конусности ( $a < -0.3$ ) в НП появляется протяженная область с деформациями большими чем  $\varepsilon_b$ . Эта ситуация качественно отличается от ситуации цилиндрического НП ( $a=0$ ) или «слабоконического» НП ( $a > -0.3$ ), когда наибольшие деформации и напряжения возникают только в основании НП. Это свойство может повы-

сить эффективность переключения проводимости в устройствах на основе конических НП [2]. Действительно, в случае латеральных изгибов конического НП InGaAs ( $a < -0.7$ ) на поверхности НП возникает достаточно длинный проводящий канал вплоть до области контакта зонд-НП.

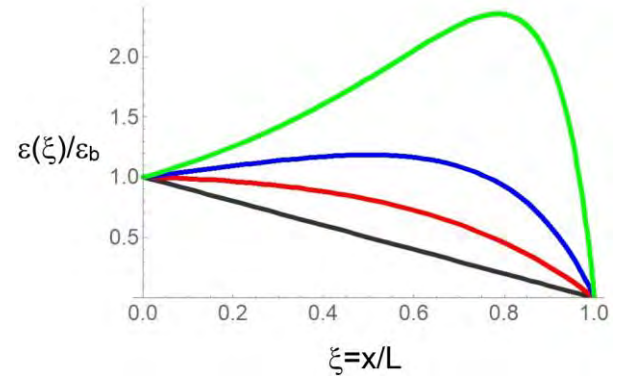


Рис. 2. Нормированные профили деформаций  $\varepsilon(\xi)/\varepsilon_b$  для конических нанопроводов с коэффициентом конусности  $a=0$  (черная кривая),  $a=-0.3$  (красная кривая),  $a=-0.5$  (синяя кривая),  $a=-0.7$  (зеленая кривая)

## Заключение

В данной работе рассмотрены упругие деформации в конических нанопроводах. Выполненные расчеты показывают, что распределение упругих деформаций в конических нанопроводах значительно отличается от ситуации в цилиндрических нанопроводах. Получено аналитическое выражение для распределения упругих деформаций по длине конического нанопровода. Обнаружено, что при определенных углах конусности в нанопроводах возникает протяженная область достаточно высоких деформаций, сопоставимых или даже больших, чем деформация у основания. При достаточно высоких углах конусности область высоких деформаций покрывает практически всю длину нанопровода, что позволяет более эффективно переключать проводимость в таких нанопроводах.

## Литература

1. Y. Wang et al. // Adv. Mater., 23, 1356 (2011).
2. P. Alekseev et al. // Nano Letters, 19, 4463 (2019).
3. M. Dunaevskiy et al. // Nano Letters, 17, 3441 (2017).
4. P. Alekseev et al. // Semiconductors, 46, 641 (2012).

# Влияние стехиометрических параметров на свойства пленок $\text{SiO}_x$ и $\text{GeO}_x$ для формирования нанокристаллов

К.В. Дуров\*, Л.Н. Мартынов, О.С. Молостова, А.В. Зайцев, А.В. Ершов, Р.Н. Крюков, А.В. Нежданов, С.Ю. Зубков, Д.Е. Николичев, К.В. Сидоренко, Н.В. Байдусь

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*zevs2801@mail.ru

Получены и исследованы тонкие (~ 100 нм) пленки  $\text{SiO}_x$  и  $\text{GeO}_x$  реактивным магнетронным ВЧ-распылением при вариации  $x$ . Исследованы стехиометрия пленок, их оптические, структурные и размерно-зависимые свойства. Рассмотрено влияние условий осаждения и последующего отжига на данные свойства. Обнаружено, что отжиг при ~ 800 и ~ 1100 °С для  $\text{GeO}_x$  и  $\text{SiO}_x$ , соответственно, мог приводить к формированию различных по размерам нанокристаллов Si и Ge в диэлектрической матрице. Обсуждаются особенности морфологии структур по рамановским спектрам и фотолюминесценции пленок при  $x \approx 1.8$ .

## Введение

Широкий спектр возможных применений и фундаментальная научная значимость побудили к обширным исследованиям полупроводниковых нанокристаллов (НК) [1,2]. Структуры с ансамблями НК Si или Ge в диэлектрической матрице обещают решение проблемы «непрямозонности» полупроводников, повышая их излучательную способность через уменьшение размерности, что открывает перспективы создания светоизлучающих устройств для новых фотонных интегральных схем.

Одним из распространенных методов создания массивов НК в диоксиде является термическое диспропорционирование субоксидов Si или Ge при отжиге [2]. Как отдельные тонкие пленки субоксидов Si и Ge, так и многослойные наноструктуры (МНС)  $\text{SiO}_x$  или  $\text{GeO}_x$ /стехиометрический диэлектрик хорошо подходят для создания массивов НК в диэлектрической матрице. Известно, что вариация размеров, слоевой плотности НК и, соответственно, оптических свойств структур возможна путем задания толщины неотожженных пленок  $\text{SiO}_x$  и  $\text{GeO}_x$  и коэффициента  $x$  [2].

Управление толщиной слоев в МНС и условиями отжига позволяет уменьшить дисперсию НК по размерам и улучшить люминесцентные свойства, что можно контролировать с помощью спектров КРС и ФЛ [1,3].

Цель данной работы состояла в изучении стехиометрии пленок  $\text{SiO}_x$  и  $\text{GeO}_x$ , их оптических, структурных и размерно-зависимых свойств.

## Методика эксперимента

Получение серии тонких пленок  $\text{SiO}_x$  и  $\text{GeO}_x$  толщиной ~ 100 нм осуществлялось методом реактивного ВЧ-магнетронного распыления в аргоновой плазме на комбинированной вакуумной установке 2G11G2-ElBeam-OQ-03 (Torr Int) с использованием мишеней из Si и Ge соответственно. В процессе распыления варьировалось парциальное давление кислорода от ~  $0.3 \cdot 10^{-4}$  до ~  $4.0 \cdot 10^{-4}$  Торр. Температура подложки составляла 200 °С. Полученные образцы  $\text{SiO}_x$  и  $\text{GeO}_x$  отжигались при температурах до 1100 и до 800 °С соответственно.

Контроль эффективного стехиометрического коэффициента проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Оптические постоянные неотожженных образцов определялись из эллипсометрических измерений. Анализ структурных и морфологических свойств пленок производился по спектрам комбинационного рассеяния света (КРС), ИК-пропускания и фотолюминесценции (ФЛ).

## Результаты и их обсуждение

Измерения РФЭС показали вариацию коэффициента  $x$  в широком диапазоне (от ~ 0.11 до ~ 1.97). По результатам ИК-пропускания сделан вывод об образовании фаз стехиометрических диоксидов  $\text{GeO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  после отжига в структурах с  $x \approx 1.8$ . Из спектров КРС и ФЛ обнаружено, что отжиг при температурах выше 700 и 1000 °С для  $\text{GeO}_x$  и  $\text{SiO}_x$ , соответственно, приводит к формированию НК Si и Ge в диэлектрической матрице с широким распределе-



нием по размерам. Оценка диаметров НК, выполненная из разложения спектров КРС на основе методик [3,4] показала, что в системе  $\text{GeO}_x$  с  $x \approx 1.8$  возможно образовывались НК Ge размером  $\sim 7$  нм (рисунок 1). Использовалась модель сильного пространственного ограничения (конфайнмента) оптических фононов, который имеет место в НК. Предполагалась сферичность формы НК Ge и отсутствие дисперсии по размерам.

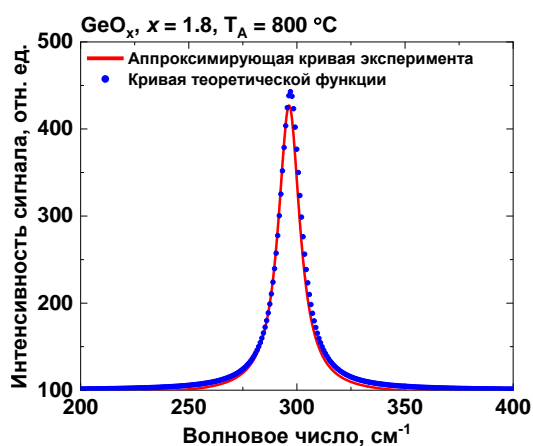


Рис. 1. Аппроксимация спектра КРС образца  $\text{GeO}_x$  с  $x \approx 1.8$  и подбор теоретической функции

ФЛ пленок  $\text{GeO}_x$  проявилась слабо, высокоинтенсивных пиков на спектрах не наблюдалось (рисунок 2). Из литературы известно, что вероятность оптических переходов в НК Ge растёт с уменьшением их размеров, а НК Ge с размерами 4 нм и более должны излучать в ИК-диапазоне [5].

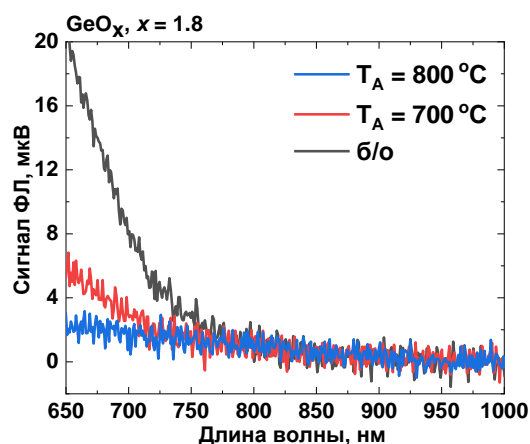


Рис. 2. Спектр ФЛ образца  $\text{GeO}_x$  с  $x \approx 1.8$

В спектрах КРС образцов  $\text{SiO}_x$  с  $x$ , отличным от 1.8, присутствует асимметричный пик при  $521 \text{ см}^{-1}$ , соответствующий наличию в системе кристаллической фазы Si (рисунок 3).

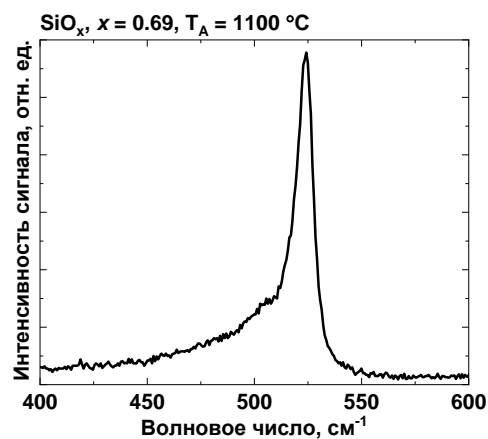


Рис. 3. Спектр КРС образца  $\text{SiO}_x$  с  $x \approx 0.69$

ФЛ структур  $\text{SiO}_x$  с  $x \approx 1.8$  в области 750 нм четко указывала на формирование НК Si с диаметром  $\sim 2-3$  нм (рисунок 4).

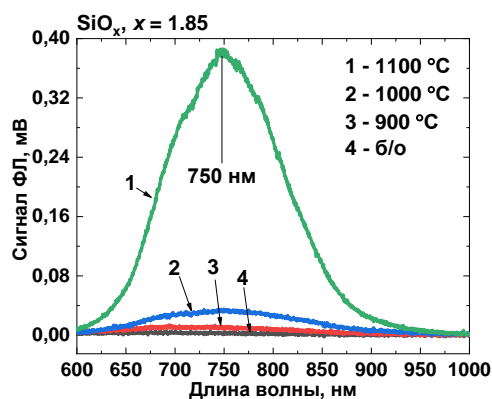


Рис. 4. Спектр ФЛ образца  $\text{SiO}_x$  с  $x \approx 1.8$

В докладе обсуждаются детали эксперимента, особенности методик определения морфологии структур и влияние стехиометрии на свойства пленок.

## Литература

1. Y.X. Jie et al. // Materials Science and Engineering B107 (2004) 8–13.
2. А.А. Ищенко, Г.В. Фетисов, Л.А. Асланов. *Нанокремний: свойства, получение, применение*. М.: Физматлит. 2012.
3. B. Zhang et al. // Energy Procedia 2 (2010) 243–250.
4. Yiaxiong Jie et al. // Journal of Applied Physics 109, 033107 (2011).
5. Y.M. Niquet, G. Allan, C. Delerue, and M. Lannoo // Appl. Phys. Lett. – 2000. V. 77. N. 8. P. 1182–1184.

# Кинетика фотолюминесценции латерально локализованных экситонов в атомарно тонких квантовых ямах GaN/AlN

Е.А. Европейцев<sup>1,\*</sup>, Д.В. Нечаев<sup>1</sup>, Д.С. Буренина<sup>1</sup>, Ю.А. Гусева<sup>1</sup>, Ю.М. Задиранов<sup>1</sup>, С.И. Трошков, М.М. Кулагина<sup>1</sup>, В.Н. Жмерик<sup>1</sup>, Т.В. Шубина<sup>1</sup>, А.А. Торопов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*evropeitsev@beam.ioffe.ru

Линии излучения одиночных локализованных экситонов экспериментально наблюдались в монослойной квантовой яме GaN/AlN с помощью микроскопии фотолюминесценции (ФЛ) с высоким пространственным разрешением, достигнутым в результате формирования из планарной гетероструктуры колонок с диаметром порядка 100 нм. Измерение кинетики затухания ФЛ в одиночных линиях с шириной ~0.6 мэВ позволяет отнести их к рекомбинации дипольно-запрещенных «тёмных» экситонов. Поверхностная плотность предполагаемых центров экситонной локализации оценивается как  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

## Введение

Квантовые ямы (КЯ) GaN/AlN монослойной (МС) толщины являются перспективными источниками ультрафиолетового излучения на длине волны около 240 нм, а также представляют фундаментальный интерес для изучения свойств экситонных состояний в двумерных системах [1, 2]. Исследования кинетики фотолюминесценции (ФЛ) и теоретический анализ тонкой структуры экситонных состояний показали, что основными состояниями в монослойных КЯ GaN/AlN являются состояния «тёмных» дипольно-запрещенных экситонов, тогда как группа «светлых» экситонов расположена выше по энергии на величину ~40 мэВ [1]. Такое расположение уровней приводит к превалированию медленно затухающей компоненты ФЛ при низких температурах (<50 К) и ускорению излучательной рекомбинации при повышении температуры.

В настоящей работе исследуется влияние флуктуирующего потенциала, связанного с латеральной неоднородностью вставки GaN, на спектр и кинетику экситонного излучения. С этой целью на основе планарных КЯ были изготовлены колонки с субмикронными диаметрами, которые исследовались методом спектроскопии ФЛ с высоким пространственным и временным разрешением в сочетании со сканирующей электронной микроскопией (СЭМ).

## Методика эксперимента

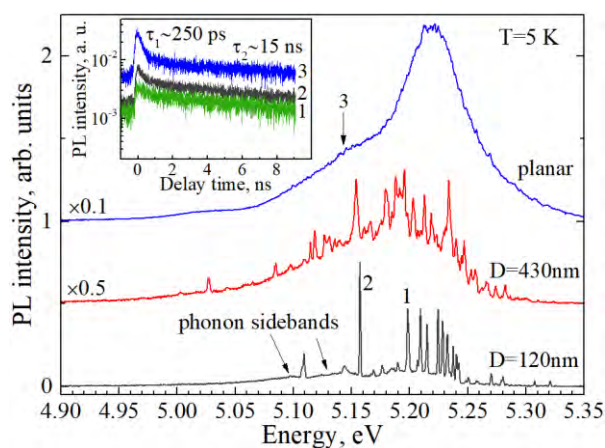
Гетероструктура с одиночной КЯ AlN/GaN/AlN была выращена с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии. Для

роста буферного слоя AlN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 1600 нм при температуре подложки T=780°C использовался метод металл-модулированной эпитаксии, после которого осаждалась КЯ GaN с номинальной толщиной 1.1 МС (T=690°C) и верхний барьерный слой AlN (1000 нм, T=780°C). Все слои выращивались в металл-обогащенных условиях при соотношении потоков Al/N=1.1 и Ga/N=2, что обеспечило двумерный механизм роста. Наноклонки формировались с помощью последовательного плазмохимического и химического травления. Первый этап травления проводился на установке с комбинированным емкостным и индуктивным разрядом в смеси реактивных газов VCl<sub>3</sub>/Ar. Для последующего жидкостного травления использовался 10% раствор KOH при температуре 60 – 90° С.

Измерения ФЛ проводились с использованием оптической схемы конфокального микроскопа с 40-кратным увеличением изображения. Для возбуждения ФЛ использовалась импульсная лазерная накачка (длительность импульса ~120 фс, частота — 76 МГц) на длине волны 215 нм со средней плотностью мощности ~1 Вт/см<sup>2</sup>. Детектирование ФЛ производилось с помощью спектрометра Acton-2500 с дифракционной решёткой 1800 штрихов/мм и охлаждаемой ПЗС-матрицей с результирующим спектральным разрешением 1.17 мэВ на длине волны 235 нм. Для определения ширины отдельных линий был использован второй порядок дифракции. Измерения кинетики ФЛ проводились методом коррелированного по времени счета одиночных фотонов. Более подробно методика измерения спектров и кривых затухания ФЛ описана в работе [2].

## Результаты и обсуждение

Спектры ФЛ в исходных планарных структурах представляют собой неоднородно уширенный пик с характерной шириной 80 мэВ. При уменьшении диаметра колонки до  $\sim 100$  нм спектр разделяется на линии с шириной порядка 0.6 мэВ при 5 К. Эта ширина сопоставима с шириной наиболее узких линий люминесценции в квантовых точках GaN/AlN, излучающих с энергией более 4 эВ [3]. На Рисунке 1 приведён спектр ФЛ планарной КЯ, а также одиночных колонок с диаметром 430 и 120 нм. СЭМ изображение последней приведено на вставке к Рисунку 2. Соотнесение количества линий ФЛ с площадью колонки позволяет оценить поверхностную плотность излучателей как  $\sim 10^{11}$  см $^{-2}$ .



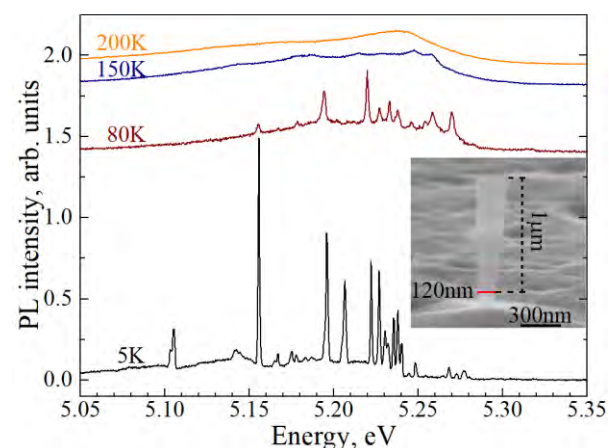
**Рис. 1.** Спектры ФЛ, измеренные в колонках с диаметром 120 и 430 нм, а также в планарном образце ( $T = 5$  К) в пределах пятна с диаметром  $\sim 10$  мкм. На вставке — кривые затухания в узких линиях ФЛ, измеренных в колонке с диаметром 120 нм (кривые 1 и 2) и в полосе ФЛ планарного образца (кривая 3)

На вставке к Рисунку 1 сравнивается кинетика ФЛ в одиночных линиях (кривые 1 и 2) с кинетикой ФЛ в планарном образце (кривая 3). Время затухания медленной компоненты ФЛ в обоих случаях составляет  $\sim 15$  нс, что указывает на отсутствие дополнительных каналов безызлучательной рекомбинации в колонке. В ФЛ планарного образца также присутствует быстро затухающая компонента, которая интерпретируется как неравновесное излучение светлых экситонов. В большинстве узких линий быстрая компонента отсутствует или сильно подавлена, что позволяет отнести наблюдаемые линии к рекомбинации тёмных экситонов. На Рисунке 2 приведены спектры ФЛ из колонки при различных температурах. При увеличении температуры выше 60 К наблюдается возгорание линий в

высокоэнергетической части спектра (5.25 – 5.30 эВ), что приводит к увеличению средневзвешенной энергии излучения на  $\sim 30$  мэВ при 125 К. Подобное поведение может свидетельствовать о термическом заполнении состояний светлых экситонов.

Помимо узких линий спектры содержат расположенные ниже по энергии широкие полосы, которые можно отнести к рекомбинации экситонов с участием акустических фононов. Для исследуемого образца характерная ширина полос составляет  $\sim 40$  мэВ при 5 К, что, согласно работе [4], согласуется с экстремальной локализацией экситонов в ультратонкой AlGaIn КЯ с флуктуирующими толщиной и/или составом. Наблюдение линий излучения одиночных локализованных экситонов позволяет надеяться на реализацию источников одиночных фотонов в солнечно-слепой области спектра.

Авторы благодарят Российский Фонд Фундаментальных Исследований (проект №19-52-12057 ННИО\_а) за частичную финансовую поддержку исследований.



**Рис. 2.** Спектры ФЛ из одиночной колонки с диаметром 120 нм, измеренные при температурах от 5 до 200 К. На вставке — СЭМ изображение исследуемой колонки

## Литература

1. A. A. Toropov, E. A. Evropeitsev, M. O. Nestoklon *et al.* // *Nano Lett.*, V. 20, 158 (2020).
2. E. A. Evropeitsev, Yu. M. Serov, D. V. Nechaev *et al.* // *JETP Lett.*, V. 113, 504 (2021).
3. M. J. Holmes, M. Arita, Y. Arakawa // *Semicond. Sci. Technol.*, V. 34, 033001 (2019).
4. I. A. Ostapenko, G. Hönl, S. Rodt *et al.* // *Phys. Rev. B*, V. 85, 081303(R) (2012).

# Генерация оптических импульсов наносекундного диапазона в многоямных InGaAs/GaAs/AlGaAs гетеролазерах с увеличенной активной областью

К.С. Жидяев<sup>1,\*</sup>, С.М. Некоркин<sup>1,§</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1</sup>, А.Б. Чигинева<sup>1</sup>, И.В. Самарцев<sup>1</sup>, А.В. Крюков<sup>2</sup>, В.А. Токарев<sup>2</sup>, Д.И. Баклашов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр-т Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», пр-т Мира, 37, г. Саров, 607188.

\*zhidyayev@nifti.unn.ru, §nekorkin@nifti.unn.ru

Продемонстрирована устойчивая работа узконаправленного многоямного InGaAs/GaAs/AlGaAs гетеролазера с увеличенной активной областью в схеме релаксационного генератора на GaAs динисторе. Получены оптические импульсы длительностью 4 – 100 нс в импульсном и импульсно-периодическом режимах накачки. Время нарастания фронта составило 1,6 нс при длительности импульса 4 нс.

Типичная структура полупроводникового лазера имеет широкую диаграмму направленности ( $\sim 40^\circ$ ) в плоскости перпендикулярной р-п-переходу. Зачастую для практических применений такое излучение требует дополнительной фокусировки. В работе [1] приведена оригинальная конструкция волновода лазера, которая сочетает в себе преимущества лазеров с асимметричной волноводной областью, с выходом излучения в подложку, а также с волноводным эффектом квантовых ям. Такая конструкция гетеролазера обеспечивает узкую диаграмму направленности ( $4^\circ - 15^\circ$  в зависимости от длины резонатора) в плоскости перпендикулярной р-п-переходу, а также позволяет добиться значительной мощности излучения в импульсном режиме накачки. Настоящая работа посвящена исследованию энергетических и временных характеристик подобного лазера, включенного в схему релаксационного генератора на динисторе.

## Исследуемые образцы и методика эксперимента

Исследуемая многоямная InGaAs/GaAs/AlGaAs лазерная гетероструктура с увеличенной активной областью выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении. Активная область на основе GaAs содержала 5 квантовых ям (КЯ) InGaAs/GaAs. Особенности конструкции и параметры структуры подробно изложены в работе [1]. Из полученной структуры, методами химического травления, ионной имплантации и метал-

лизации, изготавливались лазерные чипы полосковой геометрии с шириной активной области 360 мкм и длиной резонатора  $L = 1$  мм. На свежесколотые торцы резонаторов методом электронно-лучевого испарения наносились интерференционные покрытия с высоким ( $R = 99\%$ ) и малым ( $R = 2\%$ ) коэффициентами отражения.

Для генерации импульсов тока наносекундного диапазона использовалась схема релаксационного генератора на динисторе (РГД). В качестве последнего использовался GaAs тиристор, который был разработан нами ранее и представлял собой низковольтный малогабаритный быстродействующий коммутатор с напряжением переключения  $U_{\text{прк}} = 18$  В, конструкция которого включала в себя дополнительные слои светоизлучающего диода с КЯ [2].

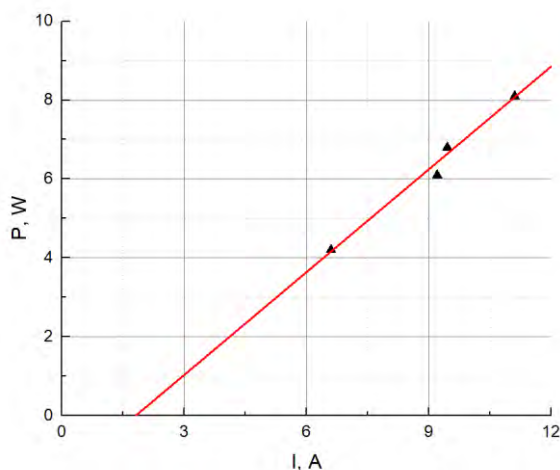
Монтаж чипов гетеролазера и тиристора производился на отдельные медные корпусные элементы при помощи In припоя, которые соединялись между собой в составной модуль. К контактным площадкам гетеролазера и тиристора методом навесного монтажа припаивались конденсатор  $C = 2 - 200$  нФ и резистор  $R = 0,2$  Ом. Емкость конденсатора задавала длительность генерируемых импульсов.

При помощи резистора измерялась величина тока накачки гетеролазера. Количество и длина проводных соединений была минимизирована для снижения влияния паразитных явлений.

Работа РГД осуществлялась как в импульсно-периодическом режиме (на РГД подавалось напряжение  $U > U_{\text{прк}}$ ), так и в импульсном. Для реализации последнего режима на РГД подавалось напряжение  $U < U_{\text{прк}}$ , а переключение тиристора происходило за счет внешнего оптического управления.

## Результаты и обсуждение

Получены электрические и оптические импульсы длительностью ( $\tau$ ) от 20 до 100 нс в импульсном режиме генерации. На основе полученных результатов были построены ватт-амперные характеристики (ВтАХ), одна из которых для импульсов длительностью 100 нс приведена на рисунке 1. Экстраполируя данную зависимость, определено значение порогового тока лазера – 1,8 А. При генерации импульсов длительностью 20, 30, 70 и 100 нс наклон ВтАХ составил 0,94; 0,91; 0,90 и 0,87 Вт/А соответственно. Такое уменьшение может быть следствием разогрева активной области гетеролазера при увеличении длительности импульсов.

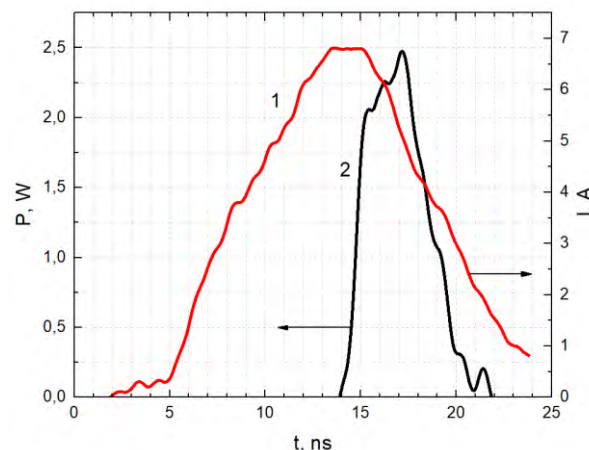


**Рис. 1.** ВтАХ гетеролазера в импульсном режиме накачки: точки – экспериментальные результаты, прямая – экстраполяция

Получена генерация оптических импульсов с амплитудой 2,5 Вт, длительностью 4 нс (длительность фронта 1,6 нс) и частотой следования 23 кГц (рисунок 2). При этом пиковый ток импульса накачки равнялся  $\sim 7$  А. Для сравнения при том же пиковом токе амплитуда оптического импульса длительностью 20 нс составила 4,3 Вт. Малая длительность импульса (4 нс) снижает эффективность оптической генерации в многоямной лазерной системе с шириной активной области 360 мкм. Отметим, что при  $\tau = 4$  нс максимум оптического импульса сдвиг

нут относительно максимума токового импульса на 3 нс.

Увеличение длительности импульса приводит к повышению значения пикового тока, максимальное значение которого составило 31,4 А при  $\tau = 100$  нс. При этом оптическая мощность гетеролазера увеличилась до 23,4 Вт. Зависимость амплитуды тока от длительности импульса может быть обусловлена скоростью распространения включенного состояния в базовых областях тиристора.



**Рис. 2.** Временные зависимости тока накачки (1) и оптической мощности (2) гетеролазера

Таким образом, продемонстрирована устойчивая работа многоямного InGaAs/GaAs/AlGaAs гетеролазера с увеличенной активной областью в схеме релаксационного генератора на GaAs диносторе уникальной конструкции. Показано, что подобный многоямный лазер способен генерировать короткие ( $\tau = 4$  нс) оптические импульсы с длительностью фронта 1,6 нс и частотой следования 23 кГц.

Установлено, что при уменьшении длительности импульса тока накачки от 100 до 20 нс происходит изменение наклона ВтАХ от 0,87 до 0,94 Вт/А, а при длительности – 4 нс оптическая генерация становится менее эффективной. Получена максимальная пиковая оптическая мощность лазерной генерации 23,4 Вт при длительности импульса 100 нс.

## Литература

1. Н.В. Байдусь, С.М. Некоркин и др. // ФТП, Т. 50, №11, 1509 (2016).
2. А.Б. Чигинева, С.М. Некоркин, Н.В. Байдусь, И.В. Самарцев, К.С. Жидяев и др. Матер. XXIII Международ. симп. "Нанопизика и наноэлектроника". (Н. Новгород, Россия, 2019) т. 2, с. 874.



# Монослойные квантовые ямы GaN/AlN: технология и применения в ультрафиолетовой фотонике от мощных излучателей до эмиттеров одиночных фотонов

В.Н.Жмерик<sup>1,\*</sup>, Д.В. Нечаев<sup>1</sup>, А.Н. Семенов<sup>1</sup>, К.Н. Орехова<sup>1</sup>, М.А. Яговкина<sup>1</sup>,  
П.А. Алексеев<sup>1</sup>, Б. Бородин<sup>1</sup>, Е.А. Европейцев<sup>1</sup>, С.И. Трошков<sup>1</sup>, М.М. Кулагина<sup>1</sup>,  
Ю.А. Гусева<sup>1</sup>, Д.С. Березина<sup>1</sup>, Т.В.Шубина<sup>1</sup>, В.И.Козловский<sup>2</sup>, М.М. Зверев<sup>2,3</sup>,  
Д.Е. Свиридов<sup>2</sup>, Н.А.Гамов<sup>3</sup>, А.А. Торопов<sup>1</sup>, С.В. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194020.

<sup>2</sup> Физический институт им.П. Н. Лебедева Российской академии наук, ул. Академика Петрова, 102, Санкт-Петербург, 433423.

<sup>3</sup> МИРЭА - Российский технологический университет, пр. Вернадского, 78, Москва, 119454.

\*jmerik@pls.ioffe.ru

Рассматриваются технологии формирования, оптические и структурные свойства монослойных одиночных и множественных квантовых ям GaN/AlN, излучающих в УФ-С диапазоне 227-260нм. Демонстрируются возможности реализации планарных излучателей с импульсной оптической мощностью до 15Вт при электронной накачке, а также наноклончатых эмиттеров одиночных узких линий.

Широкозонные наногетероструктуры (Al,Ga)N являются основой ультрафиолетовых (УФ) оптоэлектронных приборов с минимальной рабочей длиной волны  $\lambda \sim 210$  нм. Мощные излучатели в биологически активном УФ-С диапазоне ( $\lambda < 280$  нм) используются для оптической дезактивации различных патогенов, включая SARS-CoV-2. Кроме того эмиттеры одиночных фотонов в солнечно-слепом УФ-С диапазоне перспективны для разработки защищенных атмосферных и космических линий связи.

В данной работе исследовались различные типы УФ-С-излучателей на основе одиночных и множественных монослойных квантовых ям (ОКЯ и МКЯ соответственно) GaN/AlN. С целью получения атомарно-гладкой топологии поверхности этих структур и резких интерфейсов в них детально исследовалась кинетика роста таких КЯ с помощью низкотемпературной плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) в различных стехиометрических условиях. В результате получены МКЯ структуры, демонстрирующие УФ-С оптическое излучение в диапазоне 227 – 260нм с импульсной оптической мощностью выше 15 Вт.

Развитая технология формирования индивидуальных наноклонн с монослойными ОКЯ GaN/AlN

позволила продемонстрировать одиночные узкие линии в диапазоне 235 – 240 нм.

## Методика эксперимента

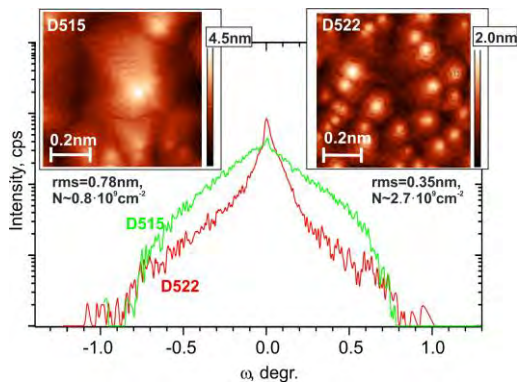
Структуры с монослойными КЯ  $N \times \{ \text{GaN}_m / \text{AlN}_n \}$ , где  $N=1 - 400$  — число КЯ,  $m=0.75 - 7$ ,  $n=16 - 22$  — толщины ям и барьерных слоев в монослоях (1МС=0.25 нм) выращивались с помощью ПА МПЭ на с-сапфире при температуре 690°C с использованием буферных AlN слоев толщиной 1.5 – 2мкм с концентрацией прорастающих дислокаций  $\sim 10^9 \text{см}^{-2}$  и величиной упругих растягивающих напряжений  $< 0.3$  ГПа. Барьерные слои росли в слегка металл-обогащенных условиях роста, стехиометрические условия роста КЯ варьировались за счет изменения отношения потоков Ga/N от 0.7 до 2. Рост контролировался с помощью мониторинга картин дифракции отраженных быстрых электронов и многолучевого измерителя упругих напряжений.

Структуры исследовались с помощью растровой электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгенодифракционного анализа, включая измерения малоуглового отражения. Оптические свойства структур изучались с помощью спектроскопии фотолуминесценции (ФЛ) и микро-ФЛ с временным разрешением, возбуждавшихся с по-

мощью 4-гармоники Ti-Sap лазера ( $\lambda = 216$  нм). Спектры катодолуминесценции (КЛ) измерялись с использованием различных токов возбуждения (от 30 нА до 2.0 А) и энергий электронов до 30 кэВ.

## Результаты и обсуждение

В результате оптимизации условий роста МКЯ структур  $400 \times \{\text{GaN}_{1.5}/\text{AlN}_{16}\}$  было улучшено качество их поверхности, имеющей островковую спиральную топологию со среднеквадратичной шероховатостью до  $\sim 0.3$  нм. Это почти на порядок лучше результатов, достигнутых в нашей предыдущей работе [1]. Показана эффективность анализа поверхности и морфологии КЯ в таких структурах с использованием моделирования и измерений малоуглового отражения и диффузного рассеяния рентгеновского излучения, демонстрируемых на Рис.1. Наблюдаемые атомарные ступени в монослойных МКЯ структурах ( $m < 2$ ) позволили объяснить снижение упругих напряжений в них и отсутствие релаксации напряжений при толщинах до 2 микрон.

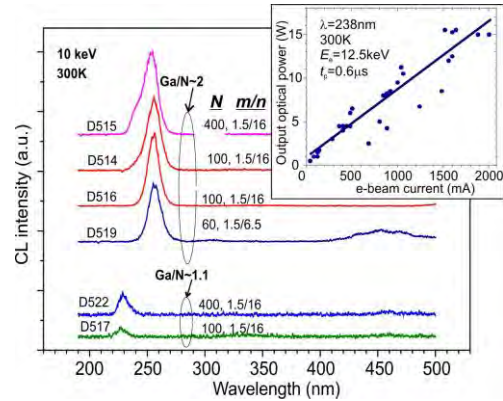


**Рис. 1.** Кривые качания малоуглового диффузного рассеяния рентгеновского излучения и АСМ изображения структур  $400 \times \{\text{GaN}_{1.5}/\text{AlN}_{16}\}$ , выращенных при различных значениях отношения потоков Ga/N: 1.1 (D522) и 2.0 (D515)

Сильное влияние условий роста КЯ GaN/AlN на спектральное положение и интенсивность пиков ФЛ и КЛ свидетельствует о сложной внутренней структуре КЯ с возможным образованием центров локализации носителей заряда типа квантовых дисков в условиях спирального ступенчато-слоевого роста при докритических толщинах КЯ ( $m \leq 2$ ). Измерения спектров ФЛ с временным разрешением в широком температурном диапазоне подтвердили экситонную природу люминесценции в структурах с такими монослойными ямами.

Рисунок 2 показывает коротковолновый сдвиг длины волны КЛ для МКЯ структур с одинаковой номинальной толщиной ям 1.5 мс при переходе от

металл-обогащенных условий роста КЯ к единичному Ga/N. Этот сдвиг объясняется различием геометрических размеров квантовых дисков.



**Рис. 2.** Спектры КЛ МКЯ структур  $N \times \{\text{GaN}_{1.5}/\text{AlN}_n\}$ , выращенных при отношении Ga/N потоков —1.1 и 2.0. На вставке показана зависимость выходной оптической мощности УФС излучения с  $\lambda=238$  нм от тока электронного пучка, измеренная для МКЯ-структуры  $400 \times \{\text{GaN}_{1.5}/\text{AlN}_{16}\}$

В спектрах КЛ при комнатной температуре наблюдаются линии излучения в диапазоне  $\lambda=227 - 260$  нм с полушириной  $\sim 10.7 - 18$  нм. При импульсной электронной накачке током до 2 А (при энергии электронов 12.5 кэВ) выходная оптическая мощность излучения с  $\lambda = 238$  нм линейно зависит от тока накачки и достигает 15 Вт со средней оптической энергией в импульсе  $\sim 5$  мкДж.

С помощью двухэтапного плазмохимического и химического травления из структур с ОКЯ GaN/AlN ( $m=1 - 2$ ) были изготовлены нанокolonны с высотой до 1 мкм и минимальным диаметром до 50 нм. Спектр микро-ФЛ нанокolonны представляет собой набор узких одиночных линий в спектральном диапазоне  $\lambda=235 - 240$  нм, число которых зависит от ее диаметра. Природа узких линий была идентифицирована как излучение одиночных экситонов, локализованных на флуктуациях толщины КЯ. Эти результаты являются предпосылкой для проведения исследований в области создания источников одиночных фотонов для солнечно-слепого УФ-С диапазона.

## Благодарности

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-52-12057\_ННИО\_a и #21-52-50004 ЯФ\_a).

## Литература

1. V. Jmerik, D. Nechaev, K. Orekhova et al. // Nanomaterials, V. 11, 2553 (2021).

# Расчет локализованных и резонансных состояний акцепторов в твердом растворе CdHgTe

М.С. Жолудев<sup>1, 2, \*</sup>, С.В. Морозов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

\*zholudev@ipmras.ru

Проведены расчёты энергий и волновых функций локализованных и резонансных состояний однозарядного акцептора в твёрдом растворе CdHgTe с учётом потенциала центральной ячейки. Получены зависимости энергий состояний от концентрации твёрдого раствора и параметров потенциала центральной ячейки.

В настоящее время твёрдый раствор CdHgTe рассматривается как перспективный материал для создания компактных источников излучения в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне [1, 2]. Создание лазерного диода с токовой накачкой требует решения проблемы создания р-области. Наиболее перспективными примесно-дефектными центрами в этом отношении представляются вакансии ртути и мышьяк. Разработка технологии легирования CdHgTe такими центрами требует тщательного исследования их влияния на энергетический спектр носителей заряда. Это, в свою очередь, предполагает разработку методов для расчёта энергий и волновых функций не только локализованных, но и резонансных акцепторных состояний. Изучение последних особенно актуально поскольку характерная энергия ионизации вакансий ртути и мышьяка составляет десятки мэВ и часто превышает ширину запрещённой зоны, необходимую для генерации длинноволнового излучения.

Ранее детальные расчёты характеристик резонансных состояний в твёрдых растворах CdHgTe проводились только для кулоновских акцепторов [3, 4]. Однако, подавляющее большинство примесно-дефектных центров в полупроводниках деформируют кристаллическую решётку, что приводит к возникновению вблизи них дополнительного электрического потенциала – потенциала центральной ячейки (ПЦЯ).

В данной работе представлены результаты расчётов параметров акцепторных состояний в твёрдых рас-

творах CdHgTe с учётом потенциала центральной ячейки.

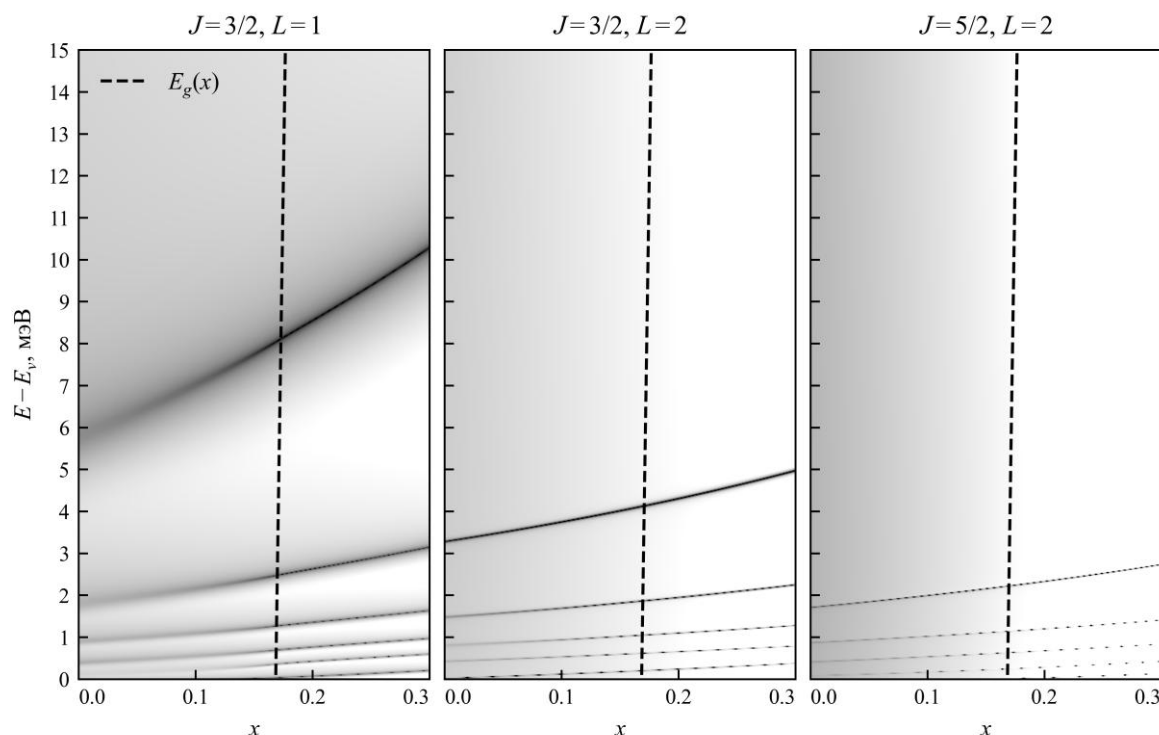
Расчёты выполнены в приближении сферической симметрии, при котором каждое состояние электрона имеет фиксированные значения полного углового момента  $J$ , его проекции  $M$  и орбитального момента  $L = J \pm 1/2$ . Из-за малой массы лёгких дырок в CdHgTe глубина состояний акцептора с  $J = 1/2$  очень мала, и мы рассматривали только состояния начиная с  $J = 3/2$ . При значениях ширины запрещённой зоны менее 0.3 эВ использовалась трёхзонная модель Кейна, учитывающая зоны с симметрией Г6 и Г8. При больших значениях ширины запрещённой зоны использовалась модель Латтинжера, учитывающая только зоны с симметрией Г8.

Аналогично работам [5, 6] мы считаем, что потенциал однозарядного акцептора с учётом вклада центральной ячейки имеет следующий вид

$$V(r) = (e/\epsilon_0 r) [1 + Z_1 \exp(-k_1 r)]$$

где  $e$  – элементарный заряд,  $\epsilon_0$  – низкочастотная диэлектрическая проницаемость, а  $Z_1$  и  $k_1$  – параметры ПЦЯ.

При расчётах волновых функций электрона в присутствии примеси применялся метод, изложенный в работе [4]. Для определения энергии локализованных и резонансных состояний использовался универсальный параметр – степень локализации волновой функции  $R(E)$  [4].



**Рис. 1.** Гистограмма значений логарифма степени локализации  $R(E)$  для состояний кулоновского акцептора в твёрдом растворе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Энергия отсчитывается от потолка валентной зоны. Положение зоны проводимости показано пунктиром

Результаты расчётов степени локализации для кулоновского акцептора приведены на рис. 1. Примесные состояния хорошо видны как чёрные линии. В случае резонансных состояний (особенно для самого глубокого состояния) хорошо видно размытие (уширение) из-за взаимодействия с зоной проводимости.

Это уширение заметно больше для растворов с меньшей долей кадмия, в связи с тем, что в них волновые функции в зоне проводимости и зоне тяжёлых дырок (которые дают основной вклад в глубокие акцепторные состояния) обладают схожей симметрией.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант РФФИ-ННИО\_а № 21-52-12020).

## Литература

1. G. Alymov, V. Rumyantsev, S. Morozov et al. // *ACS Photonics*, V. 7, 98 (2020).
2. K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev, V. V. Utochkin et al. // *Journal of Applied Physics*, V. 130, 214302 (2021).
3. М. С. Жолудев, В. В. Румянцев, С. В. Морозов, // *ФТП*, Т. 55, 861 (2021).
4. M. S. Zholudev, V. V. Rumyantsev, S. V. Morozov, // *Semicond. Sci. Technol.*, V. 37, 025003 (2021).
5. Д. В. Козлов, В. В. Румянцев, С. В. Морозов, *и др.* // *ФТП*, Т. 50, 1690 (2016).
6. V. V. Rumyantsev, D. V. Kozlov, S. V. Morozov, et al. // *Semicond. Sci. Technol.* V. 32, 095007 (2017).

# Наблюдение осцилляций Рамсея в германии, легированном мелкими донорами

Р.Х. Жукавин<sup>1,\*</sup>, П.А. Бушуйкин<sup>1</sup>, В.В. Кукотенко<sup>2,3</sup>, Ю.Ю. Чопорова<sup>2,3</sup>, N. Deßmann<sup>4</sup>, К.А. Ковалевский<sup>1</sup>, В.В. Цыпленков<sup>1</sup>, В.В. Герасимов<sup>2,3</sup>, Н.Д. Осинцева<sup>2,3</sup>, Б.А. Князев<sup>2,3</sup>, Н.В. Абросимов<sup>5</sup>, В.Н. Шастин<sup>1</sup>

1 Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия, 603950.

2 Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия, 630090.

3 Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия, 630090.

4 FELIX Laboratory, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands, 6525 ED.

5 Leibniz-Institut für Kristallzüchtung, 12489 Berlin, Germany, 12489.

\*zhur@ipmras.ru

Экспериментально показана возможность наблюдения осцилляций Рамсея при возбуждении состояния  $2p_0$  донора мышьяка в германии импульсным терагерцовым излучением лазера на свободных электронах при криогенных температурах. Контроль населенности верхнего уровня как функции времени задержки между импульсами происходил путем измерения фототока, величина которого пропорциональна населенности возбужденного уровня и обусловлена термическим возбуждением носителей заряда при конечных температурах. В ходе проведенных исследований было использовано излучение на частотах, как резонансных, так и нерезонансных с примесными переходами. Выраженные осцилляции Рамсея наблюдаются при возбуждении состояния  $2p_0$ , что обусловлено его наибольшей энергией связи, относительно малыми индуцированными термическими процессами при используемых температурах и достаточно большим временем релаксации.

## Введение

Состояния кулоновских центров в полупроводниках привлекают внимание исследователей в качестве кандидатов для создания различных квантовых устройств. Данное обстоятельство вызвано тем, что такие объекты являются естественными нульмерными образованиями, и к настоящему моменту существуют технологии контролируемого позиционирования одиночных кулоновских центров в полупроводниковой матрице с возможностью последующей манипуляции их состоянием [1]. Наибольший интерес вызывают донорные центры в алмазе, кремнии и германии, что обусловлено, в частности, возможностью создания моноизотопной матрицы и большими временами релаксации определенных состояний кубита на основе донорных состояний. На данном этапе интерес вызывают методы квантовой оптики для манипуляций когерентными состояниями, включающие, в частности, фотонное эхо и интерференцию Рамсея. В работе [2] была продемонстрирована возможность сочетания оптической записи когерентного состояния и некогерентного электрического контроля на примере состояний доноров фосфора в кремнии. Как известно, метод интерферометрии Рамсея использует два оптических импульса длительностью менее продольного и поперечного релаксационных времен двухуровневой системы. В результате воздействия первого

импульса происходит переход в суперпозицию двух состояний, а разность фаз первого и второго импульса определяет величину населенности второго уровня, понимаемую как квадрат амплитуды соответствующего вклада в волновую функцию. Воздействие первого импульса может быть рассмотрено как «запись» информации, а действие второго – как последующая манипуляция или контроль существования суперпозиции состояний. Измерение зависимости населенности второго уровня как функция времени прихода второго импульса в работе [2] происходило путем измерения фототока, величина которого пропорциональна населенности возбужденного уровня и обусловлена термическим возбуждением носителей заряда при конечных температурах.

## Эксперимент

Кристаллы германия были выращены методом Чохральского с концентрациями мышьяка  $5.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация акцепторов не превышала величину порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Образцы имели размеры  $0.5 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$ . Угол между полированными гранями  $5 \times 10 \text{ мм}$  составлял  $\sim 1.5^\circ$ . Образец помещался в проточный гелиевый криостат Janis ST-100 с окнами TPX.

Измерения проводились по четырехконтактной схеме. Между внешними контактами пропускался



постоянный ток (порядка единиц микроампер), а с внутренних контактов снималось напряжение и подавалось на осциллограф для снятия кинетики или на синхронный усилитель с возможностью последующей записи и автоматического построения величины сигнала как функции положения подвижного зеркала.

В качестве источника использовалась установка NovoFEL при Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения [3], состоящая из трех лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). В данном эксперименте использовался терагерцовый ЛСЭ с возможностью перестройки в диапазоне  $\lambda=90\text{--}340$  мкм, длительностью импульса  $\sim 100$  пс и частотой повторения 5.6 МГц. Импульс излучения делился на две, имеющие приблизительно равные по интенсивности, части, и один из импульсов проходил через линию задержки. После прохождения интерферометра оба импульса снова сводились через тот же делитель. С помощью параболического зеркала излучение фокусировалось на поверхности образца в пятно диаметром порядка 1 мм. Излучение обоих пучков модулировалось с помощью прерывателя на частоте 140 Гц, располагающегося перед входным окном криостата с образцом. В основном, в эксперименте использовалась длина волны 131.3 мкм, соответствующая переходу  $1s(A_1)\text{--}2p_0$  (9.44 мэВ), а также длина волны 160 мкм (7.7 мэВ) для сравнения с нерезонансным случаем.

На Рис. 1 представлена интерферограмма для случая резонансного возбуждения  $1s(A_1)\text{--}2p_0$  для образца с концентрацией  $1.2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . Вне резонанса (не показано) вид интерферограммы соответствует автокорреляционной функции с длительностью, соответствующей длительности импульса, при этом сигнал обусловлен, в основном, наличием остаточных примесей и термическим заселением возбужденных уровней донора. В резонансе, при задержках, превышающих длительность импульса, существует сигнал, огибающая которого имеет длительность порядка 100 пс. Преобразование Фурье при различных величинах задержки подтверждает существование осцилляций, соответствующих длине волны излучения 131 мкм. Максимальная задержка, при которой еще выделяется указанная спектральная компонента, превышает 300 пс. В случае измерения образца с большей концентрацией размер длительность осцилляций заметно меньше, при

том, что вклад осцилляций Рамсея оказывается более заметным по сравнению с паразитным сигналом.

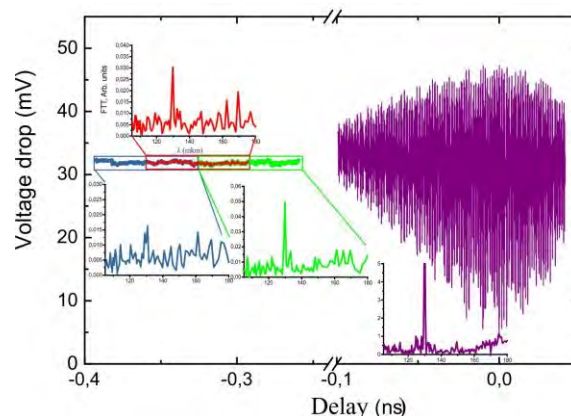


Рис. 1. Осцилляции фототока и спектр сигнала для различных интервалов задержки

## Заключение

Экспериментально показана возможность наблюдения осцилляций Рамсея при возбуждении состояния  $2p_0$  донора мышьяка в германии импульсным излучением ЛСЭ при криогенных температурах. Регистрация осцилляций населенности состояния  $2p_0$  осуществлялась благодаря наличию термического выброса электронов в зону проводимости, что можно рассматривать как демонстрацию некогерентного считывания когерентного состояния. Используемые в представленной работе образцы позволили получить времена поперечной релаксации на уровне 100 пс, что оказывается близко к соответствующей ширине линии используемого перехода и позволяет надеяться на дальнейшее увеличение времени при использовании образцов с меньшей шириной линии.

Работа поддержана грантом РФФ 19-72-20163.

## Литература

1. M. Fuechsle, J. A. Miwa, S. Mahapatra *et al.* // Nature nanotechnology, V. 7, 242 (2012).
2. K. L. Litvinenko, E.T. Bowyer, P. T. Greenland *et al.* // Nature communications, V. 6, 1 (2015).
3. Yu. Yu. Choporova, V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev *et al.* // Physics Procedia V. 84, 152, (2016).

# Структурные и оптические свойства пленок $TiO_x$

А.О. Жуков<sup>1,\*</sup>, А.В. Нежданов<sup>1,§</sup>, Д.В. Шестаков<sup>1</sup>, А.А. Скрылев<sup>1</sup>, А.И. Машин<sup>1</sup>, Д.А. Усанов<sup>2</sup>, G.De Filpo<sup>3</sup>, А.В. Ершов<sup>1</sup>

1 Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

2 Paul Scherrer Institut, Forschungsstrasse 111, Villigen CH-5232, Switzerland.

3 University of Calabria, 87036 Rende (CS), Italy.

\*zhukov967@gmail.com, §nezhdanov@phys.unn.ru

В настоящей работе представлены результаты исследования структурных и оптических свойств пленок  $TiO_x$ , полученных методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Анализ проводился методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, спектрофотометрии и атомно-силовой микроскопии. Обнаружено, что отжиг изначально аморфных пленок приводит к формированию в них структурной фазы типа анатаз, которая является оптимальной для применения данного материала в фотокаталитических процессах.

## Введение

В наше время как никогда актуальна проблема загрязнения окружающей среды. Развитие промышленности приводит к росту темпов загрязнения воды и атмосферы, а современные методы очистки зачастую являются технически сложными и дорогостоящими. Все это делает актуальной задачу разработки и исследования новых альтернативных методов очистки и утилизации различных токсичных веществ, которые позволили бы как экономически, так и технически более эффективно решать данную проблему.

Одним из наиболее перспективных для решения подобных задач методом являются применение фотокатализа. Поскольку в фотокаталитических процессах используется солнечное или ультрафиолетовое излучение и для этого требуется минимальное количество оборудования, данная технология является относительно недорогой и технически простой. Предлагается в качестве фильтрующей системы использовать мембраны из углеродных нанотрубок, модифицированных наночастицами  $TiO_2$  [1]. Подобные системы пригодны для очистки сточных вод различных химических предприятий, и потенциально являются более эффективными по сравнению с нынешними методами очистки: фильтрацией, адсорбцией и др.  $TiO_2$  – один из наиболее привлекательных фотокатализаторов, пригодных для очистки сточных вод и воздуха благодаря ряду полезных свойств: высокая фотокаталитическая активность, химическая стабильность, коррозионная стойкость, малая стоимость и многие другие [2].

## Методика эксперимента

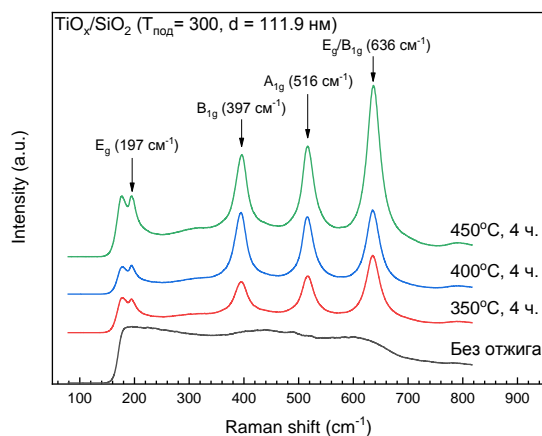
Серия пленок  $TiO_x$  разной толщины была получена методом электронно-лучевого испарения в вакууме на комбинированной вакуумной установке 2G11G2- ElBeam-OQ-03 (Torr Int, США) на различных подложках. Температура подложек в процессе напыления составляла  $300^\circ\text{C}$  и  $60^\circ\text{C}$  для разных образцов.

Спектры КРС были получены на комплексе рамановской спектроскопии NTEGRA Spectra производства компании NT-MDT (г. Зеленоград). Возбуждающее излучение фокусировалось 100x объективом с числовой апертурой 0.90. Спектры КРС были получены в схеме на отражение с разрешением  $0.8\text{ см}^{-1}$ . Спектры пропускания и отражения были получены на двухлучевом спектрофотометре “Cary 5000”. Морфология поверхности исследуемых образцов снималась с использованием атомно-силовой сканирующей головки Smea, на базе зондовой нанолaborатории NTEGRA Spectra в полуконтактном режиме. Все исследования были проведены в атмосферных условиях при комнатной температуре.

## Результаты

Полученные пленки были отожжены при различных температурах в течение нескольких часов. Параметры отжига подбирались экспериментально, а также исходя из технических ограничений, накладываемых температурными свойствами мембран из углеродных нанотрубок, которые в дальнейшем планируется модифицировать наночастицами  $TiO_2$ .

Как известно, диоксид титана существует в виде нескольких кристаллических модификаций. В природе можно встретить анатаз, рутил и брукит. Анатаз и рутил обладают тетрагональной сингонией, они принадлежат к пространственной группе  $D_{4h}^{19}$ ,  $D_{4h}^{14}$ , а брукит имеет ромбическую сингонию и принадлежит к пространственной группе  $D_{2h}^{15}$  [3].



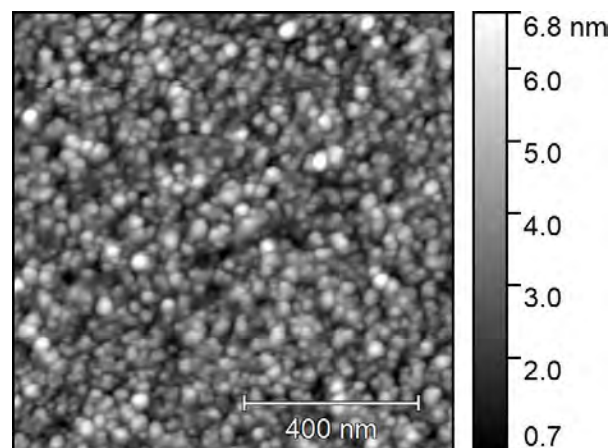
**Рис. 1.** Спектры КРС пленок  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$  ( $T_{\text{под}} = 300^\circ\text{C}$ ,  $d = 111.9$  нм) при разной температуре отжига, время отжига 4 часа, длина волны накачки 473 нм

На рис. 1 представлены спектры КРС пленок  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$  ( $T_{\text{под}} = 300^\circ\text{C}$ ,  $d = 111.9$  нм), отожженных при разных температурах. На отожженных образцах наблюдаются несколько четко различимых максимумов при 197, 397, 516 и 636  $\text{cm}^{-1}$ , которые соответствуют следующим колебательным модам анатаза:  $E_g$  (197  $\text{cm}^{-1}$ ),  $B_{1g}$  (397  $\text{cm}^{-1}$ ),  $A_{1g}$  (516  $\text{cm}^{-1}$ ) и  $E_g/B_{1g}$  (636  $\text{cm}^{-1}$ ) [1, 4]. Пики при 397, 516 и 636  $\text{cm}^{-1}$  соответствуют колебаниям связей  $\text{Ti}-\text{O}$  [4]. Широкую полосу при 240 – 350  $\text{cm}^{-1}$  можно отнести к колебаниям связи  $\text{O}-\text{O}$  [4], а небольшой пик при 197  $\text{cm}^{-1}$  соответствует колебаниям связи  $\text{Ti}-\text{Ti}$  [4].

Как можно увидеть по характеру спектров, полученные пленки изначально находились в аморфной фазе, однако при отжиге мы наблюдаем появление кристаллической фазы анатаза, причем с ростом температуры отжига интенсивность указанных пиков растет, что говорит о повышении доли кристаллической фазы. Предполагается, что в процессе роста формируются пленки  $\text{TiO}_x$  и уже в дальнейшем, при отжиге, они добивают недостающие атомы кислорода из атмосферы, достраиваясь до кристаллической фазы анатаза.

На рис. 2 представлено АСМ изображение поверхности исследуемой пленки. На поверхности видно большое количество наноостровков. Обнаружено,

что при отжиге среднеквадратичная шероховатость поверхности увеличивается, так же, как и средний размер островка.



**Рис. 2.** АСМ изображение поверхности исходного образца  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $T_{\text{под}} = 60^\circ\text{C}$ ,  $d = 141.4$  нм), среднеквадратичная шероховатость  $S_q = 1$  нм

Также были получены спектры пропускания и отражения указанных образцов, из которых при помощи построения Гауца были определены значения оптической ширины запрещенной зоны (ОШЗЗ). Для исходных аморфных пленок значение ОШЗЗ составило 3.4 эВ. В процессе отжига наблюдалось уменьшение данного значения.

Таким образом, в результате отжига в исследуемых пленках формируется кристаллическая фаза анатаза, которая проявляет наибольшую фотокаталитическую активность [5], а интенсивность наблюдаемых пиков растет с повышением температуры отжига. Вместе с этим наблюдается развитие поверхности, что потенциально будет способствовать повышению эффективности фотокаталитических процессов. Более подробное обсуждение будет представлено в стендовом докладе.

## Литература

1. G. De Filpo, E. Pantuso, K. Armentano *et al.* // *Membranes*, V. 8, 35 (2018).
2. R. Singh, S. Dutta // *Adv.P.Tech.* V. 29, 211 (2018).
3. U. Balachandran, N.G. Eror // *J. Solid State Chem.* V. 42, 276 (1982).
4. F.D. Hardcastle // *JAAS*, V. 65, 42 (2012).
5. T. Ohno, K. Sarukawa, M. Matsumura // *New J. Chem.* V. 26, 1167 (2002).

# О механизмах фотолюминесценции в коллоидных квантовых точках

Н.Д. Жуков\*, А.А. Хазанов

Общество с ограниченной ответственностью «НПП Волга», Саратов  
ndzhukov@rambler.ru

В модели конкуренции экситонного механизма и размерного электронного квантования объяснены обнаруженные новые свойства: аномальная температурная зависимость фотолюминесценции и её токовые гашение и стимуляция.

Первая волна исследований коллоидных квантовых точек (QD) была посвящена их фотолюминесцентной (ФЛ) способности в видимом спектральном диапазоне [1]. Вторая волна исследований посвящена QD на основе более узкозонного полупроводника – сульфида свинца – с целью создания технологии и применений квантовых точек, обладающих фотолюминесценцией в спектральной ближней ИК-области [2]. Следующий этап исследований в последние годы посвящён продвижению в более длинноволновую область за счёт использования узкозонных полупроводников, таких как антимонид индия [3]. Как показано в большинстве работ, ФЛ существенно растёт в вариантах QD с оболочкой и сильно падает в вариантах узкозонных полупроводников. При этом, как правило, авторы относят эти эффекты к влиянию состояния электронных свойств на границе ядро-оболочка. Однако, обнаруженные другие проявления, например, мерцание ФЛ, объясняются иными модельными представлениями [4].

В нашей работе, используя модель размерного ограничения движения электрона в QD, мы предлагаем и доказываем вариант конкуренции двух механизмов – экситонного и размерного квантования – для объяснения наблюдаемых явлений, в частности аномальной температурной зависимости фотолюминесценции, о чём сообщено в нашей статье [5]. При этом нами проведены дополнительные исследования – сравнительное соотношение уровня ФЛ и размеров QD при вариациях условий синтеза, температурной зависимости фотолюминесценции (ФЛ), влияния энергетического воздействия (электрическим полем) на состояние электронов в QD и, за счёт этого, стимуляции или гашения ФЛ.

При анализе использованы формулы для энергии экситона  $E_{ex}$  [6] и энергии электрона  $\tilde{E}_n$  [7] в зависимости от размера квантовой точки  $a$ :

$$E_{ex} = E_g + 2m_{ex}e^3h^{-2} + n^2h^2(2m_{ex}a_{ex}^{-2})^{-1} - 3.6e^2(\epsilon a_{ex})^{-1} \quad (1)$$

$$\tilde{E}_n \sim h^2n^2(8m_e a^2)^{-1} \quad (2)$$

где:  $h$  – постоянная Планка;  $e$  – заряд электрона;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $n$  – квантовое число;  $m_{ex} = m_e m_p (m_e + m_p)^{-1}$  – масса экситона,  $m_e$  и  $m_p$  – эффективная масса электрона и дырки, соответственно.

Размер  $a_{ex}^*$  устойчивого состояния экситона вычисляется из равенства третьего и четвёртого слагаемых в формуле (1):  $a_{ex}^* = 0.14\epsilon(hn/e)^2/m_{ex}$ .

Исследование проведено на образцах, изготовленных по технологиям, описанным в работах [2, 3]: QD- CdSe(ZnS), CdTe(CdS); PbS, PbS(CdS); InSb, InSb(CdS), (в скобках указаны формулы оболочек).

На рис. 1,а приведены типичные кривые температурной зависимости интегральной фотолюминесценции для QD-CdSe(ZnS) (кр. 1) и, для сравнения – стандартных люминофоров ZnCdS:Ag, отечественного (кр.2) и импортного (кр. 3). Поведение кривых температурной зависимости ФЛ квантовых точек халькогенидов кадмия качественно мало отличается от стандартных люминофоров с той разницей, что изменения – существенно значительней. Уменьшение ФЛ с ростом температуры в данном случае связано с возрастающим рассеянием рекомбинирующих носителей на фононах. В случае же квантовых точек за счёт влияния поляризации и уменьшения  $\epsilon/\epsilon_0$  уменьшается критический параметр  $a_{ex}^*$ , что приводит к уменьшению вероятности образования экситонов. При этом кванторазмерное ограничение электронов не вносит своего влияния, поскольку его критический параметр – длина волны де Бройля для электрона  $\Lambda \sim h(2m\tilde{E}_n)^{-1/2}$  – меньше размеров QD и параметра  $a_{ex}^*$ .

На рис. 1,*b* приведены кривые температурной зависимости интегральной ФЛ для QD сульфида свинца: кр.1-2 – PbS(CdS) для спектральных максимумов 1500 и 1200 нм (размеры QD  $a \sim 5 \pm 1$  нм), 3 – QD-PbS с размерами  $a \sim 8 \pm 2$  нм.

Размерное квантование в глубокой протяжённой квантовой яме QD физически проявляется в том, что электрон в устойчивом состоянии (на квантовом уровне) совершает резонансное колебательное движение между границами до момента, когда он: либо туннелирует из QD, либо перейдёт в другое устойчивое состояние, либо рекомбинирует с дыркой. При этом в последнем случае вероятность не-излучательной рекомбинации будет значительно больше, чем излучательной. Возможно также и то, что электрон «прилипнет» в некое устойчивое состояние на границе ядра QD с его окружением или в нём самом. Используя такую модель, можно объяснить обнаруженные экспериментально явления.

Для образцов QD-PbS с относительно большими размерами ( $a \sim 8 \pm 2$  нм) и всех вариантов QD антимонида индия характерно сильное влияние квантоворазмерного ограничения так, что фотолюминесценция либо не наблюдается, либо имеет очень малый уровень (кр. 3. рис. 1,*b*). При этом необходимо отметить, что в этих случаях расчёты по формуле (1) приводят к некорректным результатам.

Для образцов QD-PbS с размерами  $a \sim 5 \pm 1$  нм температурные зависимости имеют аномальный характер (кр. 1-2, рис. 1,*b*). В формуле (1) зависящие от температуры величины  $m_{ex}$  и  $\epsilon$  с её ростом изме-

няются так, что уменьшается энергия связи экситона и, соответственно, уменьшаются вероятность его образования и время жизни. В связи с этим, с ростом температуры, начиная от точки максимума, интенсивность ФЛ QD- CdSe(ZnS) и CdTe(CdS) (рис. 1*a*, кр. 1) и QD-PbS (рис. 1,*b*, кр. 1-2) примерно линейно уменьшается.

Уменьшение ФЛ для QD-PbS (рис. 1,*b*, кр. 1-2) с уменьшением температуры, начиная от точки максимума, можно объяснить, учитывая, что в квантовых точках с высокими параметрами размерного квантования, какими являются КТ-PbS, происходит конкуренция эффектов, когда квантоворазмерное ограничение уменьшает вероятность фотолюминесценции. И поскольку с уменьшением температуры эффективная масса уменьшается, то есть размерное квантование усиливается, относительная интенсивность ФЛ уменьшается.

Для образцов QD-PbS, имеющих большой разброс по размерам (кр. 3 рис. 1,*b*), люминесцирующими являются QD относительно больших размеров, в которых квантоворазмерное ограничение, если оно даже и есть, не является лимитирующим. В этих случаях, скорее всего, проявляется механизм захвата электронов уровнями приграничных состояний. Об этом могут свидетельствовать характер температурных и спектральных зависимостей. Построения и расчёты по формуле Арениуса позволили получить значения – 0.28 и 0.08 eV.

Работа выполнена с поддержке гр. РФФИ 20-07-00307.

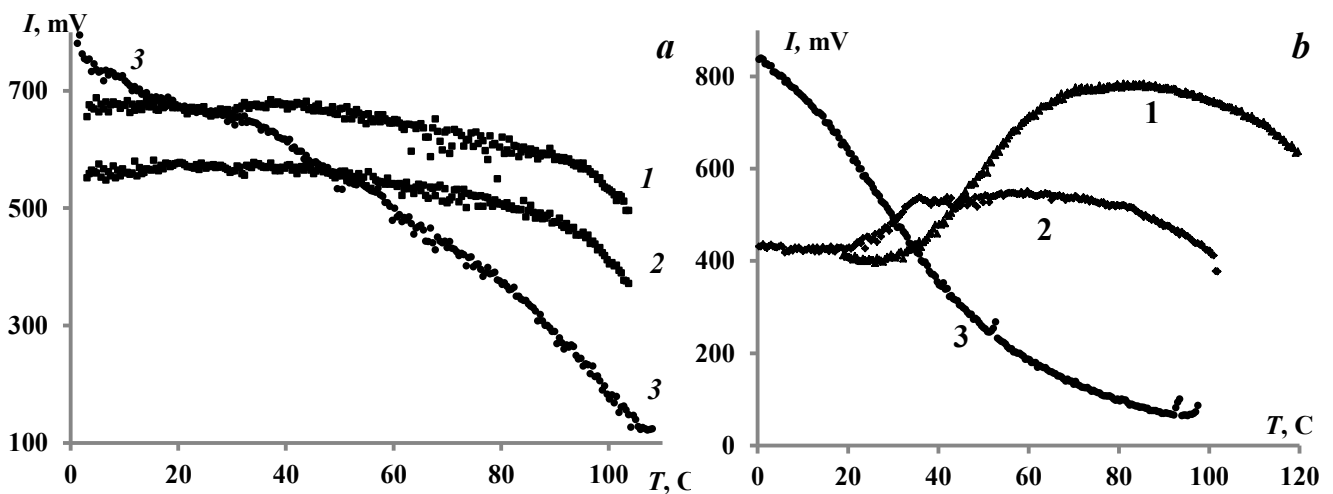


Рисунок 1 – Зависимости уровня ФЛ (сигнала фотоприёмника) от температуры.

*a*: 1 - QD-CdSe(ZnS); 2, 3 – порошковые люминофоры ZnCdS:Ag;

*b*: 1 – QD-PbS(CdS)-1500 нм; 2 – QD-PbS(CdS)-1200 нм; 3 – QD-PbS

**Литература**

1. Наночастицы, наносистемы и их применение. Под ред. В.А.Мошникова. Уфа: Аэтерна, 2015. ISBN 978-5-906808-95-0.
2. Дежуров С.В., Трифонов А.Ю., Ловыгин М.В., и др. Российские нанотехнологии. **11**, 5–6, 54-59 (2016).
3. Д.В. Крыльский, Н.Д. Жуков. Письма в ЖТФ. **46**, 18, 15-18 (2020).
4. Перепелица А.С. Автореф. канд. дисс. <http://www.science.vsu.ru/dissertations.pdf>
5. Н.Д. Жуков, С.А. Сергеев, А.А. Хазанов, И.Т. Ягудин. Письма в ЖТФ. **47**, 22, 37-40 (2021).
6. С.И. Садовников, Н.С. Кожевникова, А.И. Гусев. ФТП, **45**, 12, 1621-1632 (2011).
7. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин, *Основы нанозлектроники*, (М.: Логос, 2006) 340 с.



# Влияние процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных транзисторных структур

И.Ю. Забавичев<sup>1, 2, \*</sup>, А.С. Пузанов<sup>1, 2</sup>, С.В. Оболенский<sup>1, 2</sup>

1 Филиал РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ул. Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603950.

2 Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*zabavichev.rf@gmail.com

Исследовано влияние формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных структур. Проведены оценки изменения проводимости канала современных кремниевых транзисторов с различными размерами рабочих областей.

## Введение

Радиационное воздействие потока отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) приводит к ухудшению таких параметров полупроводниковых материалов как концентрация и подвижность основных носителей заряда. Причиной данных изменений является возникновение скоплений структурных повреждений – кластеров радиационных дефектов (КРД), вызванному упругим взаимодействием ОЯЧ (протона, нейтрона, альфа частицы, тяжелой заряженной частицы или первичного атома отдачи) с атомами кристаллической решетки вещества [1]. Формирование кластера радиационных дефектов, наряду с упругим взаимодействием отдельных атомов, сопровождается процессом ионизации, который заключается в генерации неравновесных электронно-дырочных пар.

Данные процессы имеют различные пространственные и временные масштабы, поэтому по мере уменьшения топологических размеров транзисторных структур и характерных времен переключения ячеек ОЗУ на их основе, описанные выше явления в различной степени влияют на перенос носителей заряда. В данной работе впервые проведен анализ влияния процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных транзисторных структур.

## Параметры разупорядоченной области

В современных приборах, где энергия подвижных носителей заряда может достигать 1 эВ, длина волны электронов может стать меньше расстояний

между ОПЗ субкаскадов в каскаде смещенных атомов. Таким образом, протяженные кластеры радиационных дефектов распадаются на цепочку независимых, непрозрачных для высокоэнергичных носителей заряда включений – субкластеров радиационных дефектов (СКРД).

Ионизация при радиационном воздействии возникает по причине двух процессов: кулоновского взаимодействия заряженной частицы с электронами внешних орбиталей атомов кристаллической решетки и ударного взаимодействия двух атомов, в результате которого изначально покоящийся атом кристаллической решетки приобретает энергию, большую чем кинетическая энергия орбитальных электронов на внешней оболочке.

Обобщая вышеизложенное, в таблице 1 представлены характерные пространственные и временные масштабы процесса упругого и ионизационного взаимодействия при образовании разупорядоченной области первичным атомом отдачи Si с энергией 50 кэВ.

**Таблица 1.** Параметры процесса формирования разупорядоченной области

Объект	Пара Френкеля	Электронно-дырочная пара	КРД	Ток ионизации
Масштаб				
Расстояние, нм	2	3	11	24
Время, пс	$10^{-4}$	$10^{-3}$	100	0,2

Из представленных результатов следует, что пространственные и временные масштабы процессов

упругого взаимодействия и ионизации существенно различаются: Поэтому для оценки влияния формирования единичного кластера на параметры работы транзисторных структур данные процессы можно рассматривать по отдельности.

## Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты влияния процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных транзисторных структур выполнены для различных топологических норм, подробные характеристики которых представлены в работе [2].

Для оценки изменения размеров КРД в каждый момент времени использовался программный комплекс LAMMPS [3] и методика, представленная в работе [4]. Для решения задачи кластеризации (разбиения отдельного каскада смещений на отдельные субкаскады) каждой реализации разупорядоченной области использовался алгоритм DBSCAN [5].

На рисунке 1 представлены зависимости относительного изменения проводимости канала транзисторной структуры во для различных длин затвора при формировании КРД первичным атомом отдачи Si с энергией 50 кэВ.

Из представленных результатов следует, что с уменьшением размеров канала транзистора возможна ситуация, когда в течении короткого промежутка времени проводимость канала падает практически до нуля с последующим восстановлением. В этом случае возникает обратимый сбой работы транзисторной структуры, несвязанный с ионизационными процессами.

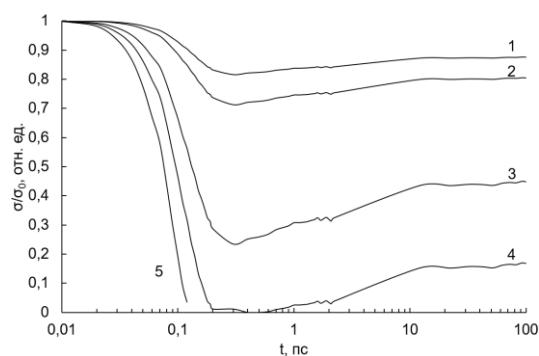


Рис. 1. Относительное изменение проводимости канала транзисторной структуры с различной длиной затвора: 1 – 24 нм, 2 – 18 нм, 3 – 14 нм, 4 – 10 нм, 5 – 6 нм

## Заключение

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального центра физики и математики (НЦФМ).

## Литература

1. Б. А. Калинин *и др.* Физическое материаловедение. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. М.: МИФИ, 2008. – 696 с.
2. International Roadmap for Devices and Systems. 2017 Edition, Copyright @ 2018 IEEE.
3. S. Plimton. J. Comput. Phys., 117(1), 1 (1995).
4. И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. Физика и техника полупроводников, 53(9), 1279 (2019).
5. M. Ester, H. Kriegel, X. Xu // Proceedings of the Second International Conference on knowledge discovery and data mining, 1996. P. 226-231.

# Плазмонные солитоны в экранированных двумерных электронных системах

А.А. Заболотных<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11-7.

\*andrey.zabolotnyh@phystech.edu

Аналитически исследуются плазменные уединенные волны (солитоны) в двумерной электронной системе параллельно которой расположены идеально проводящие электроды (затворы). Солитоны анализируются с помощью непертурбативного модельного подхода, в рамках которого уравнение Пуассона для связи потенциала и плотности заряда солитона заменяется на эффективное уравнение. Отличие данного подхода от традиционных пертурбативных подходов (применимых в слабонелинейном режиме) в том, что он не только позволяет получить аналитическое выражение для формы солитона, но и дает возможность рассмотреть режим сильной нелинейности, когда возмущение концентрации, связанное с солитоном, порядка равновесной концентрации.

Теоретически исследуются плазменные солитоны в двумерной (2D) электронной системе (ЭС), экранированной двумя идеально проводящими затворами, расположенными выше и ниже 2D ЭС. Солитоны — это нелинейные волны, которые сохраняют свою форму в процессе распространения. Качественно, сохранение формы становится возможным благодаря «компенсации» нелинейности уравнений динамики и «эффектов дисперсии», т.е. нелинейности спектра обычных волн.

Подобная задача впервые была рассмотрена в работе [1], в которой для описания нелинейных плазменных волн уравнение Пуассона, связывающее электрический потенциал и плотность заряда в 2D ЭС, раскладывалось в Фурье-пространстве по параметру  $qd$ , где  $d$  — расстояние между металлическими затворами и 2D ЭС, а  $q$  соответствовал волновому вектору плазмона в линейном режиме. При этом, параметр  $qd$  считался малым, а разложенное уравнение содержало первую и третью степень этого параметра (экранировка осуществлялась двумя затворами, поэтому квадратичное слагаемое отсутствовало), что в конечном итоге в координатном пространстве приводило к уравнению типа Кортевега - де Вриза, имеющего известные солитонные решения. Недостатком данного метода является то, что из-за разложения по  $qd \ll 1$ , возможно рассмотрение только режима слабой нелинейности, когда ширина солитона велика по сравнению с  $d$ , а возмущение концентрации мало по сравнению с равновесной.

В данной работе вместо разложения по  $qd$  используется метод замены ядра в интегральной форме уравнения Пуассона на более простое (по аналогии с методом, примененным в [2,3] для поиска спектра краевых плазменных возбуждений), который, также как и метод разложения по  $qd$ , позволяет решить задачу аналитически. Однако, кроме того, метод замены ядра позволяет рассмотреть нелинейные плазменные волны с характерным масштабом неоднородности вплоть до  $d$  и возмущением концентрации порядка равновесной.

Также в работе найдена связь параметров солитона: амплитуды, скорости и ширины. В рамках использованного подхода получено, что солитоны имеют скорости, лежащие в диапазоне от  $v_p$  до  $2v_p$ , где  $v_p$  — скорость линейных плазменных волн в длинноволновом пределе  $qd \ll 1$ . При скоростях солитона вне этого интервала, по-видимому, стабильных солитонов не существует.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ 21-72-00114.

## Литература

1. А. О. Говоров, В. М. Ковалев, А. В. Чаплик // Письма в ЖЭТФ, Т. 70, С. 479 (1999).
2. A. L. Fetter // Physical Review B, V. 32, 7676 (1985).
3. А. А. Заболотных, В.А. Волков // Письма в ЖЭТФ, Т. 104, 424-429 (2016).

# Квазистационарные плазмоны в частично экранированных двумерных электронных системах

А.А. Заболотных<sup>1</sup>, В.В. Еналдиев<sup>1, 2, 3</sup>, В.А. Волков<sup>1, \*</sup>

1 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11-7.

2 National Graphene Institute, University of Manchester, Booth St. E. Manchester M13 9PL, United Kingdom.

3 University of Manchester, School of Physics and Astronomy, Oxford Road, Manchester M13 9PL, United Kingdom.

\*volkov.v.a@gmail.ru

Рассмотрены квазистационарные плазменные колебания в бесконечных двумерных (2D) электронных системах (ЭС) вблизи которых расположен затвор в виде полосы или диска. Квазистационарность связана с конечным временем жизни этих плазменных колебаний по отношению к распаду в континуум незэкранированных плазмонов, существующих в 2D ЭС вдали от затвора. Обсуждается связь квазистационарных мод с особенностями в рассеянии плазменных волн на экранированных областях 2D ЭС.

Доклад посвящен результатам аналитического исследования т.н. околзатворных плазмонов, возникающих в частично экранированных 2D ЭС, когда сама 2D ЭС однородна и бесконечна, а расположенный вблизи неё затвор имеет форму полосы или диска, т.е. ограничен по одному или двум направлениям. Известно, что в случае затвора в форме бесконечной полосы возникает серия плазменных волн, распространяющихся вдоль затвора и локализованных около него в поперечном направлении [1,2]. Однако, помимо таких локализованных в поперечном направлении мод в 2D ЭС с затвором в форме полосы существуют также квазистационарные околзатворные плазмоны, имеющие конечное время жизни по отношению к распаду в континуум незэкранированных 2D плазмонов. Спектр таких околзатворных плазмонов, соответственно, лежит внутри 2D континуума.

Если рассмотреть 2D ЭС с затвором в форме диска, то окажется, что *все* околзатворные плазмоны являются квазистационарными, т.е. «настоящих» локализованных около затвора мод не возникает [3].

Однако, тот факт, что часть околзатворных плазмонов существует на фоне континуума незэкранированных 2D плазмонов означает, что такие квазистационарные плазмоны должны возбуждаться с помощью незэкранированных плазмонов и проявляться как особенности в рассеянии последних на части 2D ЭС, находящейся под затвором. И дей-

ствительно, в работе [3] было показано, что сечение рассеяния незэкранированных 2D плазмонов на экранированной области 2D ЭС в форме диска как функция частоты 2D плазмона имеет ряд выраженных максимумов. Пики в сечении рассеяния соответствуют возбуждению квазистационарных околзатворных плазмонов, а ширина пиков позволяет определить время жизни таких плазмонов. Кроме того, показано [3], что приложение внешнего перпендикулярного магнитного поля приводит к простой сдвигке частот резонансов рассеяния, что делает магнитное поле удобным инструментом для исследования данного явления.

Предполагается, что экспериментально такое рассеяние плазмонов может быть реализовано и визуализировано с помощью техник типа сканирующей ближнеполевой оптической микроскопии (SNOM).

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ 21-12-00287.

## Литература

1. A. A. Zabolotnykh, V. A. Volkov // *Physical Review B*, V. 99, 165304 (2019).
2. А. М. Зарезин, П. А. Гусихин, И. В. Андреев *et al.* // *Письма в ЖЭТФ*, Т. 113, С. 740 (2021).
3. A. A. Zabolotnykh, V. V. Enaldiev, V. A. Volkov // *Physical Review B*, V. 104, 195435 (2021).

# Эффекты запаздывания в плазменных колебаниях 2D диска

И.В. Загороднев\*, Д.А. Родионов, А.А. Заболотных

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11 корп. 7, Москва, 125009.

\*zagorodnev@phystech.edu.

Анализируются плазменные колебания в диске из двумерного электронного газа с учетом эффектов электромагнитного запаздывания и внешнего перпендикулярного магнитного поля. Показано, что частота плазменных резонансов может быть достаточно хорошо найдена из закона дисперсии плазменных колебаний для бесконечной системы подходящим размерным квантованием волнового вектора. Затухание плазменных колебаний таким способом не описывается и необходимо как минимум корректно учитывать радиационные потери, отсутствующие в бесконечной системе.

Недавно систематические экспериментальные исследования плазменных резонансов в дисках из двумерного электронного газа в квантовых ямах GaAs/GaAlAs, в режиме, когда электромагнитное запаздывание не мало (т.е. когда размер диска достаточно велик и сравним с длиной волны возбуждающего излучения), выявили целую область параметров, в которой практически отсутствуют аналитические расчеты, а местами даже качественное понимание физических процессов [1]. И если частоту плазменных резонансов в таких дисках можно качественно описать, используя размерное квантование волнового вектора плазмона размером диска в законе дисперсии для бесконечной системы (с учетом электромагнитного запаздывания), то корректно описать ширину линии поглощения или, по-другому, затухание плазменных колебаний, таким способом не удастся. В таких случаях, часто считают, что ширина линии определяется суммой столкновительного и радиационного уширений [2,3]. Столкновительное уширение определяется обратным временем релаксации носителей, а радиационное – потерями энергии на излучение (в пренебрежении столкновениями). Данный доклад является продолжением работы [4]. В нём будут теоретически проанализированы резонансная частота и ширина линии поглощения электромагнитного излучения двумерным электронным газом в форме диска, в том числе в магнитном поле.

Будет показано, что в практически интересном случае, когда частота плазменных резонансов больше обратного времени релаксации (столкновительного уширения), положение резонансов слабо зависит от времени релаксации, в то время как ширина мод существенно зависит от соотношения между столк-

новительным и излучательным уширением и не является их суммой. Ширина линии поглощения зависит от величины электромагнитного запаздывания немонотонно и при определенном подборе параметров может быть меньше столкновительного уширения.

В постоянном магнитном поле, ортогональном плоскости 2D системы, для небольших дисков (когда электромагнитным запаздыванием можно пренебречь) с ростом величины магнитного поля частота плазменного резонанса выходит на циклотронную частоту, т.е. асимптотически линейно зависит от магнитного поля. При этом максимум поглощения приходится на наименьшую по частоте моду, отвечающую основному радиальному «квантовому» числу. С увеличением размеров диска (и ростом роли электромагнитного запаздывания) в магнитном поле пик поглощения смещается в сторону больших радиальных чисел, а асимптотическое поведение резонансных частот в магнитном поле усложняется.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-12-00287.

## Литература

1. P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, A.A. Zagitova *et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 121, 176804 (2018).
2. I. Zoric, M. Zach, B. Kasemo, C. Langhammer // *ACS Nano* 5, 2535 (2011).
3. I.V. Andreev, V.M. Muravev, V.N. Belyanin, I.V. Kukushkin // *Appl. Phys. Lett.* 105, 202106 (2014).
4. I.V. Zagorodnev, D.A. Rodionov, A.A. Zabolotnykh // *Phys. Rev. B* 103, 195431 (2021).

# Новый люминесцентный центр, связанный с переходными элементами, в кристаллическом диоксиде титана

Д.А. Зазымкина, С.И. Ченцов, Д.Ф. Аминев, С.Н. Николаев, В.С. Кривобок

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский пр-т., 53, Москва, 119991.

\*zazymkina\_darya@mail.ru

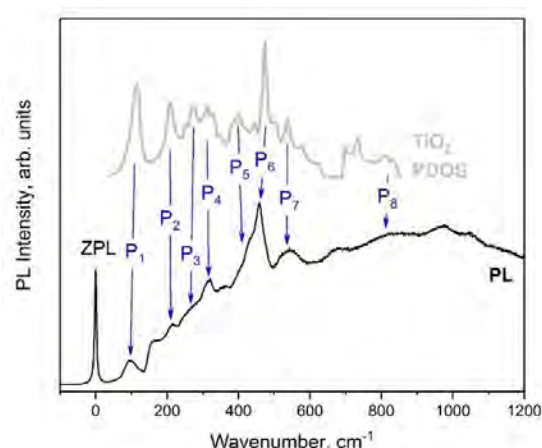
В ближнем ИК диапазоне исследована стационарная и разрешенная по времени низкотемпературная (5К) люминесценция порошков кристаллического диоксида титана. При оптическом возбуждении порошков ниже края фундаментального поглощения обнаружен новый люминесцентный центр, формирующий бесфононный переход в районе 1.573 эВ, серию фононных повторений в диапазоне 1.565-1.545 эВ и широкую полосу с максимумом в районе 1.42 эВ. Совокупность свойств обнаруженного люминесцентного центра указывает на его связь с внутрицентровыми оболочками переходного элемента. Химический анализ исследуемых порошков позволяет утверждать, что основным кандидатом на роль данного элемента является примесь ванадия.

При гелиевых температурах исследованы люминесцентные свойства микро и нанопорошков диоксида титана в ближнем ИК диапазоне.

Обнаружено, что при оптическом возбуждении ниже края фундаментального поглощения в спектрах излучения доминирует люминесцентная система, состоящая из узкого  $\sim 1$  мэВ перехода, серии спутных пиков и широкой полосы с максимумом в районе 1.42 эВ (**Рисунок 1**). Характерный вид спектра излучения не меняется при использовании оптического возбуждения с разными длинами волн, что указывает на связь всех линий с одним и тем же люминесцентным центром. Данный вывод подтверждается измерениями спектров фотолюминесценции с временным разрешением. В частности, для всех компонент спектра излучения регистрируются одинаковое затухание сигнала люминесценции в условиях импульсного возбуждения.

Анализ тонкой структуры спектров в диапазоне 1.573-1.545 эВ позволяет однозначно отождествить пик в районе 1.573 эВ с бесфононным переходом, а структуру в районе 1.565-1.545 эВ – с фононными повторениями, стоксовы сдвиги которых соответствуют локальным максимумам в фононной плотности состояний рутитовой фазы. Связь центра именно с рутитовой фазой подтверждается резким, приблизительно на два порядка, увеличением интенсивности обнаруженной люминесцентной системы после отжига при температуре 1000С. Данный отжиг приводит к структурной перестройке порошков, преимущественно состоящих из анатазной фазы, в рутитовую фазу.

Совокупность свойств обнаруженного люминесцентного центра указывает на его связь с внутрицентровыми оболочками переходного элемента. Внутрицентровый характер перехода подтверждается тем, что свойства люминесцентной системы не чувствительны к размеру кристаллитов при их уменьшении вплоть до 10 нм. Химический анализ исследуемых порошков с помощью масс-спектропии в индуктивно связанной плазме позволяет утверждать, что основным кандидатом на роль данного элемента является примесь ванадия. Альтернативная интерпретация может быть связана с атомами титана ближайшее окружение, которых нарушено.



**Рис. 1.** Черная кривая - пример спектра низкотемпературной (5К) фотолюминесценции микропорошка диоксида титана, записанный в условиях оптического возбуждения излучением с длиной волны 405 нм. Серая кривая сверху иллюстрирует плотность фононных состояний для рутитовой фазы диоксида титана



Широкую полосу в районе  $\sim 1.42$  эВ мы предварительно связываем с проявлением неадиабатического электрон-фононного взаимодействия характерного для некоторых типов внутрицентровых переходов. Существование адиабатических (узкий пик с фоннными повторениями) и неадиабатических (широкая бесструктурная полоса) переходов для одного и того же центра связано, по-видимому, с наличием тонкой структуры для возбужденного состояния системы. Данная тонкая структура позволяет также объяснить биэкспоненциальный характер затухания сигнала люминесценции при низких температурах.

Из измерений спектров возбуждения люминесценции следует, что у обнаруженной люминесцентной системы существуют внутрицентровые возбужденные состояния формирующие полосы поглощения в районе 3.1 эВ и 2.5-2.9 эВ.

Данные полосы обеспечивают возможность квази-резонансного возбуждения люминесцентной системы делая ее перспективной для реализации оптических маркеров диоксида титана, в том числе, в наноформе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант МИКРОМИР # 19-05-50145).

# Особенности оптических и морфологических свойств отожженных многослойных наноструктур $\text{Ge}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Ge}/\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$

А.В. Зайцев<sup>1</sup>, А.В. Ершов<sup>1,\*</sup>, К.В. Дуров<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, Р.Н. Крюков<sup>1</sup>, С.Ю. Зубков<sup>1</sup>, Д.Е. Николичев<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1</sup>, А.А. Левин<sup>2</sup>, М.В. Байдакова<sup>2</sup>

1 Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

2 Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021.

\* ershov@phys.unn.ru

Методом электронно-лучевого испарения в вакууме сформированы многослойные наноструктуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$  с фиксированными толщинами слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и Ge, равными 5 и 3 нм, соответственно, а толщина Si-слоев для разных образцов составляла 0 и 1-3 нм. Образцы подвергались отжигу в интервале температур 700 – 900°C. Для анализа оптических и структурных свойств использовались методы комбинационного рассеяния света, фотолюминесценции, рентгеновских методик фотоэлектронной спектроскопии, рефлектометрии и дифрактометрии.

## Введение

Считается, что уменьшение размерности кремния или германия до 0-мерной решит проблему низкой излучательной способности, связанной с «непрямозонностью» энергетических диаграмм данных полупроводников. Это актуально не только для создания перспективных светоизлучающих приборов, но и солнечных преобразователей и элементов энергонезависимой памяти.

В последнее время особый интерес проявляется к структурам типа «ядро/оболочка» в диэлектрической матрице, поскольку в них можно управлять параметрами зон на гетеропереходе II-типа. С помощью моделирования, на основе полуэмпирического метода, предполагается локализация электронов в Si-оболочке, дырок в Ge-ядре, а также  $L-X$  переключение минимума зоны проводимости, что значительно влияет на вероятность переходов с участием фононов [1]. Кремний, «обволакивая» германий, предотвращает его окисление при взаимодействии с матрицей. Результаты по экспериментальному получению квантовых точек Ge/Si «ядро/оболочка» в аморфном оксиде алюминия представлены в [2].

В данной работе обсуждается связь модификации высокотемпературным отжигом структурных свойств образцов, выявленных из рентгеновских методик с оптическими параметрами, включая структурные данные, представленные в [2, 3].

## Методика эксперимента

Напыление многослойных наноструктур (МНС)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$  проводилось методом электронно-лучевого испарения при последовательном осаждении несколько десятков периодов чередующихся нанослоев германия, кремния, оксида алюминия. Подложки – сапфир (R-срез) и КДБ-20 Si(100). Температура осаждения 310°C. Толщина слоев контролировалась кварцевым датчиком. Образцы подвергались изохронному (60 мин) отжигу при температурах от 700 до 900°C в атмосфере азота. Свойства образцов изучались методами комбинационного рассеяния света (КРС), фотолюминесценции (ФЛ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), рентгеновской рефлектометрии (XRR) и рентгеновской дифрактометрии (XRD). Сканирующая зондовая нанолaborатория NTEGRA Spectra использовалась для снятия спектров КРС. Спектры ФЛ при комнатной температуре измерялись на установке Nanometrics RPM PL Wafer Mapping System в интервале длин волн 580-1200 нм. Спектры РФЭС были получали на установке Omicron Multiprobe RM при возбуждении фотоэмиссии Al- $K_\alpha$ -излучением. XRD и XRR измерения проводились на рентгеновских дифрактометрах D2 PHASER (Cu- $K_\alpha$  излучение) и D8 DISCOVER (Cu- $K_\alpha$ ) с полупроводниковыми позиционно-чувствительными детекторами LYNXEYE (Bruker AXS, Германия), работающими как линейный и точечный детектор соответственно.

## Результаты и их обсуждение

На спектрах РФЭС, полученных при анализе МНС  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$  без отжига и отожженных, было зафиксировано соединение  $\text{GeO}_x$ , также как и для структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$ . Послойное профилирование структур методом РФЭС, дополненное возможностью ионного травления, показало повторяемость заданной при получении периодичности слоев МНС. КРС свидетельствует об образовании фаз Si-Ge сплава и нанокристаллов (НК) Ge, а также о влиянии толщины Si оболочки на образование Si-Ge сплава. При отсутствии слоев Si кристаллизация Ge начинается при  $700^\circ\text{C}$ , «внесение» слоев Si повышает температуру появления НК Ge вплоть до  $900^\circ\text{C}$ . В МНС  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$  исчезли характерные моды КРС колебаний НК Ge (с-Ge) после отжига при  $800^\circ\text{C}$  и выше. В МНС  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$  такого эффекта не было обнаружено.

Для образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$  (5/3 нм) при отжиге  $700^\circ\text{C}$  наблюдается ощутимая ФЛ при комнатной температуре при 1.8 эВ, связываемый с Ge НК; и рост температуры отжига смещает пик в синюю область (к 2.1 эВ при  $900^\circ\text{C}$ ), при росте интенсивности пика в несколько раз. Для образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$  (рис.1) после отжига на спектрах ФЛ присутствует два пика, которые мы связываем со свечением от интерфейсных дефектов Ge (2.1 эВ) и НК Si и/или Ge (1.6 эВ).

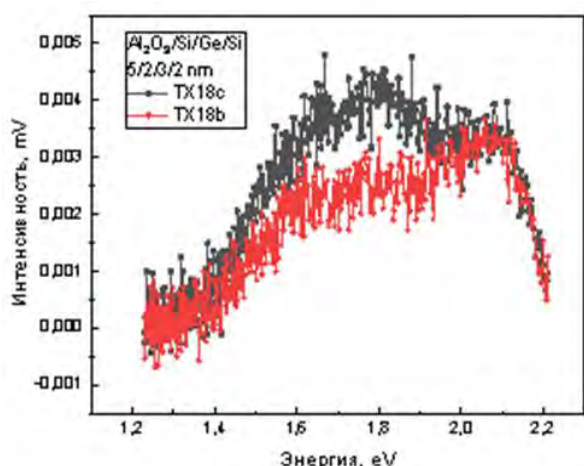


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$  (5/2.3/2 нм) при отжиге  $700^\circ\text{C}$  (TX18b) и  $900^\circ\text{C}$  (TX18c)

По результатам XRD-исследований обнаружено, что МНС  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$  после отжига  $700^\circ\text{C}$  содержит одно широкое отражение, которое можно отнести или к двум перекрывающимся отражениям (с индексами Миллера-Браве  $hkl = 30\text{-}30$  и  $11\text{-}23$ ) фазы  $\text{Al}_6\text{Ge}_5$  с кристаллитами  $\text{DXRD} \sim 6$  нм [3]; или. к

широкому отражению  $hkl = 111$  от Ge фазы с размером кристаллитов  $\text{DXRD} = 3.1(1)$  нм. Это подтверждается хорошим согласием расчетных параметров кубической элементарной ячейки этой фазы Ge,  $a = 5.6645(1)$  Å, с параметром элементарной ячейки табличного Ge ( $5.6576$  Å). Отжиг  $800^\circ\text{C}$  и выше дает отражения фазы кристаллитов  $\text{Al}_6\text{Ge}_5$  с большими размерами кристаллитов ( $> 100$  нм). Это не исключает наличие мелких ( $\leq 3$  нм) Ge-кристаллитов (не видны из-за слишком широких рефлексов). Для МНС  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$  после отжига при  $800^\circ\text{C}$  и выше наблюдается одно довольно широкое отражение  $hkl = 111$  Ge от кристаллитов с  $\text{DXRD} \approx 3\text{-}4$  нм. Рассчитанные параметры кубической элементарной ячейки  $a$  соответствуют твердому раствору  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  с  $x = 0.501(1)$  и  $0.676(1)$  после отжига при  $800$  и  $900^\circ\text{C}$ , что хорошо согласуется с [3].

Кривые XRR, полученные от всех образцов до отжига, показали интерференционную картину, характерную для периодических МНС, вплоть до 5-го порядка (до углов рассеяния  $\sim 4^\circ$ ). Было проведено численное моделирование экспериментальных XRR кривых. Изменения профилей в зависимости от температуры отжига указывают на кристаллизацию новых фаз в образце и на значительные изменения морфологии МНС, что проявляется в затухании интерференционных картин. В докладе обсуждаются полученные данные и их согласование с данными [3].

## Благодарности

XRD и XRR измерения выполнены в ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

## Литература

1. М.О. Nestoklon, А.Н. Poddubny, Р. Voisin, К. Dohnalova. J. Phys. Chem. C, 120 (33), 18901 (2016).
2. О.М. Сресели, Н.А. Берт, В.Н. Неведомский, А.И. Лихачев, И.Н. Ясиевич, А.В. Ершов, А.В. Нежданов, А.И. Машин, Б.А. Андреев, А.Н. Яблонский. Физ. Техн. Полупр. 54. 129 (2020)
3. М.В. Байдакова, Н.А. Берт, В.Ю. Давыдов, А.В. Ершов, А.А. Левин, А.Н. Смирнов, Л.А. Сокура, О.М. Сресели, И.Н. Ясиевич // Физ. Техн. Полупр. 55. 882 (2021).

# Зависимость поверхностного потенциала пленки $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ на поверхности Si(111) от ее толщины

К.Е. Захожев<sup>1,\*</sup>, Д.И. Роголо<sup>1</sup>, С.А. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, ул. Пирогова, 30, Новосибирск, 630090.

\*k.zakhozhev@g.nsu.ru

На пленке  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$  толщиной ~6 нм контактным методом атомно-силовой микроскопии получена квадратная литографическая структура со ступенчатой морфологией. Методом зонда Кельвина измерено распределение поверхностного электрического потенциала в области данной структуры. Изучена зависимость поверхностного электрического потенциала от толщины пленки. Предложена модель плоского конденсатора для описания полученных экспериментальных данных. В рамках данной модели оценено значение поверхностной плотности заряда на пленке при толщине от 3,5 до 5,5 нм:  $\sigma = 1,7 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Показано наличие скачков зависимости электрического поля от толщины пленки. Предполагается, что данные скачки обусловлены появлением новых поверхностных состояний, либо их перезарядкой.

## Введение

Двумерные полупроводниковые материалы (в частности халькогениды металлов) образуют класс перспективных материалов для создания на их основе светодиодов, фототранзисторов, солнечных элементов, а также гибких элементов электроники. Селенид индия ( $\text{In}_2\text{Se}_3$ ) представляет особый интерес для создания на его основе солнечных ячеек, фотодетекторов, элементов памяти на основе изменения фазовой структуры вещества [1]. В последнее время, одной из главных проблем является поиск способов интеграции слоистых материалов ( $\text{In}_2\text{Se}_3$  в частности) с кремниевой электроникой [2]. В процессе роста  $\text{In}_2\text{Se}_3$  на поверхности Si(111) образуется гетеропереход  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$ , свойства которого изучены слабо.

## Методика эксперимента

Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), используемый в данной работе, основан на ван-дер-ваальсовом взаимодействии тонкой иглы и поверхности исследуемого образца. В контактном режиме работы АСМ, зонд находится на расстоянии ~0,2 – 0,3 нм. Между иглой и образцом возникает сильное отталкивающее взаимодействие, из-за чего сканируемая поверхность образца может быть повреждена при сканировании более твердым-зондом, что позволяет создавать литографические структуры.

Для получения распределения поверхностного потенциала в данной работе использовался двухпроходной метод зонда Кельвина, в котором при пер-

вом проходе иглы сканируется рельеф поверхности, а при втором проходе составляется карта распределения поверхностного потенциала.

Методом АСМ монокристаллической кремниевой иглой с алмазным напылением в контактном режиме скоблилась поверхность пленки  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$  для формирования квадратной ступенчатой структуры  $15 \times 15 \text{ мкм}$ . После чего, изображение рельефа и контактной разности потенциалов были получены методом зонда Кельвина (рис. 1).

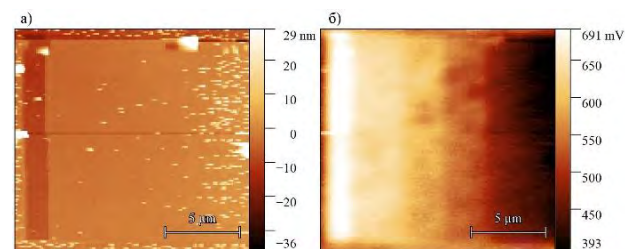


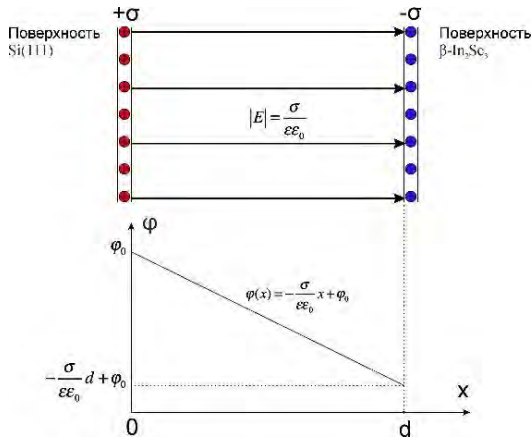
Рис. 1. АСМ изображение подготовленной структуры в режиме зонда Кельвина: а – топография поверхности, б - распределение поверхностного потенциала

## Модель плоского конденсатора

В данной работе рассматривается поверхностный потенциал пленки толщиной ~6 нм  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  с гетеропереходом  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$ . За счет возникновения заряда на поверхности пленки и наличия равномерно распределенных положительно заряженных доноров в кремниевой подложке можно рассмотреть систему как плоский конденсатор.

Если плотность заряда на пластинах плоского конденсатора  $\sigma$ , то напряженность электрического поля между обкладками пропорциональна  $\sigma$  и в си-

стеме СИ равна:  $E = \sigma/\epsilon\epsilon_0$ , где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная (рис. 2). Распределение потенциала в конденсаторе:  $\varphi = x \cdot \sigma/\epsilon\epsilon_0 + \varphi_0$ , если принять потенциал равным  $\varphi_0$  на обкладке в начале координат (рис. 2). Потенциал принимает значение  $\varphi(d) = -d \cdot \sigma/\epsilon\epsilon_0 + \varphi_0$  на обкладке с отрицательной плотностью заряда, где  $d$  – расстояние между обкладками конденсатора. При уменьшении  $d$ , потенциал поверхности с плотностью заряда  $-\sigma$  линейно увеличивается.



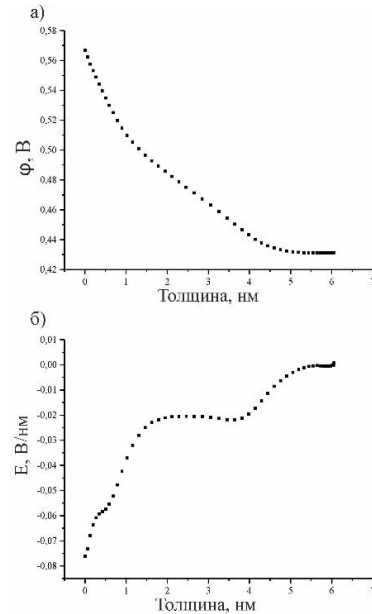
**Рис. 2.** Модель плоского конденсатора. Сверху схематически показаны обкладки конденсатора и электрическое поле между ними, снизу – распределение электростатического потенциала между обкладками

### Результаты и обсуждение

Методом АСМ с помощью кельвин-зонда было получено картированное изображение распределения поверхностного потенциала подготовленной квадратной литографической структуры со ступенчатой морфологией (рис. 1). Потенциал поверхности  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  не изменялся на отдельных участках, соответствующих постоянной толщине пленки. Это позволило получить зависимость распределения поверхностного потенциала и её первой производной в зависимости от толщины пленки (рис. 3). В модели плоского конденсатора зависимость поверхностного потенциала от толщины пленки соответствует зависимости потенциала на обкладке конденсатора от расстояния между обкладками. Первая производная полученной зависимости соответствует напряженности электрического поля в конденсаторе.

Горизонтальным участкам электрического поля  $E$  соответствует постоянная поверхностная плотность

заряда  $\sigma$ . Наличие нескольких скачков данной зависимости свидетельствует об изменении  $\sigma$ , что указывает на появление дополнительных поверхностных состояний, либо их перезарядке. Учитывая, что для  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$   $\epsilon \approx 10$  [3], была оценена поверхностная плотность заряда при толщине пленки от 3,5 до 5,5 нм:  $\sigma = 1,7 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .



**Рис. 3.** Графики экспериментальных зависимостей: а) потенциала поверхности пленки  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  от толщины, б) электрического поля между поверхностями  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  и Si(111)

Таким образом, в данной работе впервые для изучения гетероперехода  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$  был использован метод зонда Кельвина в сочетании с зондовой литографией. Получена зависимость поверхностного потенциала пленки  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$  от её толщины и сделано предположение, что наличие скачков электрического поля связано с появлением новых поверхностных состояний, либо их перезарядкой.

### Литература

1. X. Tao, Y. Gu. // *Nano Lett.*, V. 8, 3501–3505 (2013).
2. S. J. Rathi, D. J. Smith, J. Drucker. // *Cryst. Growth Des.*, V. 9, 4617–4623 (2014).
3. Wei Li, Fernando P. Sabino, Felipe Crasto de Lima *et al.* // *Physical Review B*, V. 98, 165134 (2018).

# Способ легирования фосфором $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в методе электроимпульсного плазменного спекания

Д.А. Здравейцев<sup>1, 2, \*</sup>, М.В. Дорохин<sup>2</sup>, Ю.М. Кузнецов<sup>1, 2</sup>, П.Б. Дёмина<sup>1</sup>, И.В. Ерофеева<sup>1</sup>, А.В. Здравейцев<sup>1</sup>, А.Ю. Завражнов<sup>3</sup>, М.В. Ведь<sup>1</sup>, А.В. Воронин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 Россия.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 Россия.

<sup>3</sup> Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018 Россия.

\*daniel.zdorov@gmail.com

В работе предложен новый способ легирования твердого раствора германий-кремний фосфором в процессе синтеза методом электроимпульсного плазменного спекания: в качестве источника легирующей примеси использован фосфид кремния. Приводятся исследования транспортных и термоэлектрических характеристик полученных образцов твердого раствора германий-кремний электронного типа проводимости в зависимости от технологических условий синтеза и состава. Установлены параметры спекания, при которых достигается высокая термоэлектрическая добротность материала.

## Введение

Термоэлектрики – материалы, преобразующие тепловую энергию в электрическую. Эффективность преобразования  $ZT$  определяется выражением:

$$ZT = \alpha^2 T / \rho \lambda, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Зеебека,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. Тенденции последних лет направлены на исследования  $ZT$  полупроводниковых керамик  $\text{GeSi}$ , сформированных спеканием нанопорошков. Такие материалы обладают рекордно низкой теплопроводностью при сохранении высокого коэффициента Зеебека и низкого удельного сопротивления [1].

## Технология формирования структур

Особенностью данной работы является использование нетоксичного фосфида кремния в качестве источника легирующей примеси твердого раствора германий-кремний. Подобный подход позволяет избежать использования токсичного фосфора для легирования, чем существенно облегчить работу с исходными порошками. Исходные материалы в этом случае представляют собой кристаллические кремний, германий и сплав фосфида кремния.

Перед спеканием материалы химически очищали от оксидов, затем измельчали в порошок со средним размером частиц 500 нм. Порошок загружали в графитовую пресс-форму и спекали в установке электроимпульсного плазменного спекания

(ЭИПС) DR-SINTER модель SPS-625 Spark Plasma Sintering System при давлении 70 МПа до температуры 1040 °С. Была сформирована серия образцов, в которой варьировалась концентрация легирующей примеси и скорость разогрева порошковой смеси ( $v$ ) (табл. 1).

## Методика эксперимента

Контроль уровня легирования осуществлялся путём определения концентрации ( $n$ ) свободных носителей заряда по данным измерения сопротивления Холла [2].

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов

№ образца	Состав	$v$ , °С/мин	$n$ , $10^{20}$
1	$\text{Ge}_{0,348}\text{Si}_{0,647}\text{P}_{0,005}$	25	1,60
2		50	0,92
3	$\text{Ge}_{0,343}\text{Si}_{0,642}\text{P}_{0,015}$	25	1,44
4		50	1,31

Регистрация температурной зависимости  $\alpha$  проводилась при создании контролируемого градиента температур с последующим измерением сигнала термо-ЭДС системой сбора данных L-CARD E14-140M. Удельное сопротивление  $\rho$  измеряли по стандартной четырёхконтактной схеме.

Температурную зависимость  $\lambda$  получали методом стационарного теплового потока. Расчёт  $ZT$  проводился по формуле (1).

Методики измерений более подробно описаны в [3].



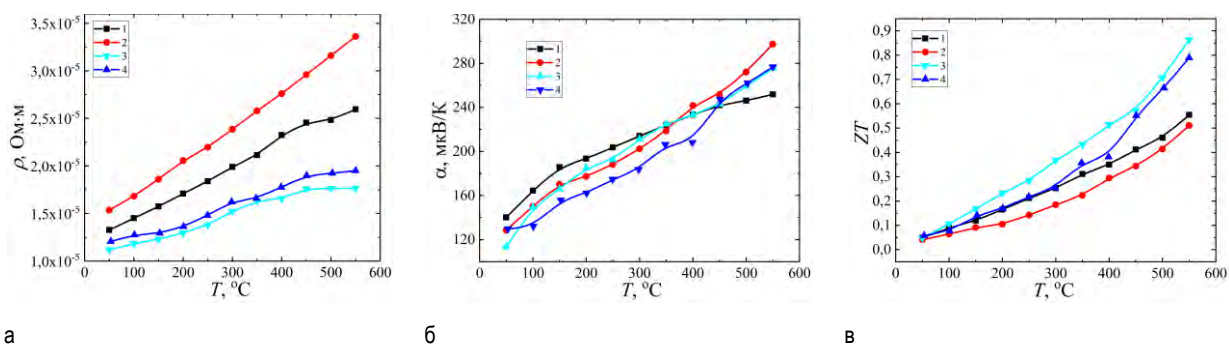


Рис. 1. Экспериментально полученная температурная зависимость: а – удельного сопротивления, б – коэффициента Зеебека, в – термоэлектрической добротности. Кривые обозначены номерами образцов (табл. 1)

## Результаты

В таблице 1 приведены значения концентрации свободных носителей заряда, рассчитанные на основании анализа магнитопольевой зависимости сопротивления Холла исследуемых образцов. Высокие значения концентраций свободных носителей заряда свидетельствуют о высоком уровне легирования твёрдого раствора GeSi из источника фосфида кремния. Причины отсутствия корреляции между концентрацией свободных носителей заряда и введённой примеси, вероятно, связаны с достижением предела равновесной растворимости фосфора в кремнии. При этом у структур 3 и 4 с повышенным содержанием фосфора удельное сопротивление ниже чем у 1 и 2 во всём интервале температур (рис. 1а).

Важно также отметить, что снижению удельного сопротивления способствует также и снижение скорости спекания. Такое поведение удельного сопротивления предположительно объясняется лучшим диффузионным перемешиванием атомов Ge, Si и P в процессе спекания при более низких скоростях разогрева. Эту тенденцию можно проследить, сравнив попарно кривые образцов 1 и 2, 3 и 4.

Величина  $\alpha$  определяется концентрацией свободных носителей заряда [4], поэтому значения коэффициента Зеебека исследуемых образцов близки во всём измеряемом температурном интервале (рис. 1б).

Величины коэффициента теплопроводности образцов также близки и составляют  $\sim 4$  Вт/м·К.

По формуле (1) была рассчитана температурная зависимость термоэлектрической добротности исследуемых образцов (рис. 1в). Из графика видно, что  $ZT$  образцов 3 и 4 выше чем образцов 1 и 2. При этом наилучшей характеристикой термоэлектрической эффективности во всём измеряемом интервале температур обладает образец 3. Такое улучшение

термоэлектрических свойств достигается за счёт снижения удельного сопротивления в образцах с повышенным содержанием фосфора. Предполагается, что дальнейшее увеличение концентрации примеси позволит увеличить термоэлектрическую эффективность.

Также отметим, что полученные значения термоэлектрических коэффициентов хорошо согласуются с мировыми аналогами [5-7].

## Выводы

В работе показан новый способ легирования фосфором наноструктурированных термоэлектрических материалов на основе твёрдого раствора германий-кремний в процессе синтеза методом электроимпульсного плазменного спекания. Установлены оптимальные технологические параметры, а также уровень легирования, при которых достигаются высокие значения термоэлектрической эффективности.

Работа выполнена в рамках выполнения гос. задания (проект 075-03-2020-191/5) и гранта РФФИ (20-32-90032).

## Литература

1. J. Mao, G. Chen, Z. Ren // *Nature Materials*, V. 20, 454 (2021).
2. M.M. Nassary // *J. Alloys Compd.*, V. 398, 21 (2005).
3. I.V. Erofeeva et al. // *Sem.*, V. 51, 1403 (2017).
4. В.А. Кульбачинский и др. // *ФТП*, Т. 45, 1241 (2011).
5. X.W. Wang et al. // *Appl. Phys. Lett.*, V. 93, 193121 (2008).
6. R. Murugasami et al. // *Bull. Mater. Sci.*, V.118, 110483 (2019).
7. K. Romanjek et al. // *J. Electron. Mater.* V. 44, 2192 (2015).

# Структурные и оптические свойства двумерных слоев Si и Ge, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках CaF<sub>2</sub>/Si(111)

В.А. Зиновьев<sup>1</sup>, \* С.А. Дерябин<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>1,2</sup>, А.Ф. Зиновьева<sup>1,2</sup>, С.Г. Черкова<sup>1</sup>, Ж.В. Смагина<sup>1</sup>, А.В. Двуреченский<sup>1,2</sup>, А.Ю. Крупин<sup>3</sup>, О.М. Бородавченко<sup>4</sup>, В.Д. Живулько<sup>4</sup>, А.В. Мудрый<sup>4</sup>

1 Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, ул. Академика Лаврентьева, д.13, Новосибирск, 630090, Россия.

2 Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, д. 1, Новосибирск, 63009, Россия.

3 Новосибирский государственный технический университет, ул. Карла Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Россия.

4 ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. П. Бровки, д. 19, Минск, 220072, Республика Беларусь.

\*zinoviev@isp.nsc.ru, zinoviev19@mail.ru

Разработаны подходы к получению эпитаксиальных структур, содержащих двумерные слои Si и Ge, встроенные в диэлектрическую матрицу CaF<sub>2</sub>. Исследования методом комбинационного рассеяния света продемонстрировали наличие узких пиков рассеяния на колебаниях Si-Si и Ge-Ge связей в плоскости роста структур. В спектрах фотолюминесценции созданных структур обнаружены полосы излучения, которые могут быть связаны с излучательной рекомбинацией носителей заряда в двумерных слоях Si и Ge, встроенных в CaF<sub>2</sub>.

## Введение

В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к графеноподобным материалам на основе кремния и германия [1]. Ожидается, что эти материалы будут иметь электронную структуру с прямой запрещенной зоной, что должно приводить к эффективной люминесценции. Настоящая работа направлена на разработку подходов к формированию двумерных слоев Si и Ge, встроенных в диэлектрическую матрицу CaF<sub>2</sub>, а так же на исследование их структурных и оптических свойств.

## Методика эксперимента и синтез

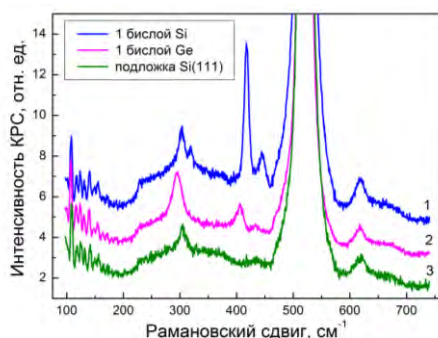
Синтез структур выполнялся методом молекулярно-лучевой эпитаксии. На первом этапе проводился эпитаксиальный рост плёнки CaF<sub>2</sub> толщиной 40 нм на подложке Si(111), которая служила основой для создания двумерных слоев Si или Ge. На втором этапе на поверхность плёнки CaF<sub>2</sub> осаждались ультратонкие слои Si или Ge с эффективной толщиной около 1 атомного бислоя в диапазоне температур от 200° до 550°C. На третьем этапе созданные структуры закрывались защитным слоем CaF<sub>2</sub> толщиной 5 нм. Исследования морфологии поверхности выращенных структур осуществлялось методами атомно-силовой и сканирующей электронной мик-

роскопии (СЭМ), что позволило определить условия роста, благоприятные для формирования двумерных слоев Si и Ge. Для контроля in-situ состояния поверхности использовалась техника дифракции быстрых электронов (ДБЭ), которая позволяла осуществлять контролируемое воздействие электронным лучом дифрактометра на выделенные участки поверхности формируемой структуры. Элементный состав и люминесцентные свойства созданных структур исследовались методами комбинационного рассеяния света (КРС), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) и фотолюминесценции (ФЛ).

## Результаты и обсуждение

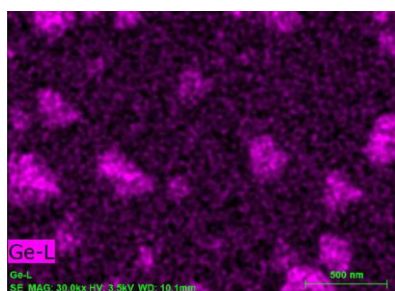
Исследования методом КРС проведённые для структур с 1 бислоем Si встроенным в CaF<sub>2</sub> показали наличие хорошо выраженного узкого пика при 418 см<sup>-1</sup> (кривая 1, рис. 1) вне области воздействия ДБЭ. Данный пик может быть связан с колебаниями Si-Si связей в плоскости роста двумерного слоя Si, интеркалированного Ca [2]. Тогда как в спектрах КРС снятых в областях воздействия электронным пучком присутствуют три пика при 418, 388 и 346 см<sup>-1</sup>, которые характерны для кристаллических слоев CaSi<sub>2</sub> [2]. Исследование люминесцентных свойств созданных структур вне области воздействия ДБЭ показало наличие полосы излучения с

максимумом при 680 нм ( $\sim 1.82$  эВ), что может быть связано с излучательной рекомбинацией носителей заряда в двумерных слоях Si, встроенных в диэлектрическую матрицу CaF<sub>2</sub>.

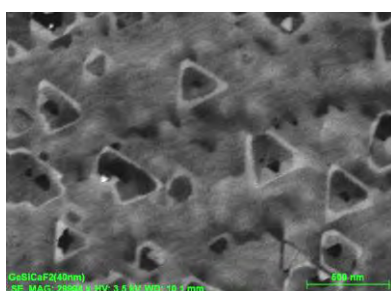


**Рис. 1.** Спектры КРС эпитаксиальных структур, представляющих собой плёнку CaF<sub>2</sub> со встроенным в него биатомным слоем Si (1) или Ge (2). Спектр КРС исходной подложки Si(111) (3)

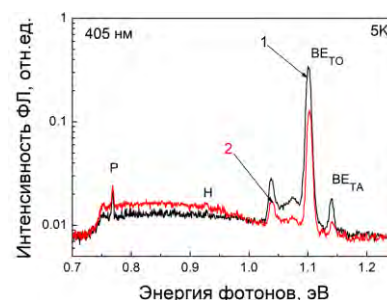
Для структур, полученных осаждением 1 бислоя Ge на поверхность плёнки CaF<sub>2</sub> в условиях облучения электронным пучком, спектры КРС демонстрируют наличие двух пиков при 295 и 407 см<sup>-1</sup> (кривая 2, рис. 1).



(a)



(b)



(v)

**Рис. 2.** (а) Карта распределения Ge вдоль поверхности структуры, (б) СЭМ - изображение поверхности структуры; (в) спектр ФЛ от структуры с Ge: в области облучения электронным пучком (2) и вне этой области (1)

На рисунке 2 (в) приведены спектры ФЛ структуры с двумерными островками Ge на CaF<sub>2</sub>, снятые при температуре  $\sim 5$  К и фотовозбуждении лазером на длине волны 405 нм. Из спектров видно, что воздействие электронным пучком (кривая 2, рис. 2 (в)) приводит к усилению сигналов ФЛ приблизительно на 20 – 25 % в спектральной области, которая приближена к ширине прямой (в Г-точке) запрещенной зоны Ge, составляющей при криогенных температурах  $\sim 0.80 - 0.84$  эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-52-00016) и БРФИ (грант №Ф20Р-082).

Спектральное положение первого пика близко к пику рассеяния на колебаниях Ge-Ge связей в монокристаллическом Ge ( $301.5$  см<sup>-1</sup>) [3]. Второй пик соответствует рассеянию на колебаниях Ge-Si связей в гетероструктурах Ge/Si [3].

Пик при  $295$  см<sup>-1</sup> мы связываем с напряжёнными двумерными островками Ge, которые формируются на поверхности CaF<sub>2</sub> обогащенной кремнием. Формирование двумерных островков Ge подтверждается данными EDX и СЭМ (рис. 2, (а) и (б)).

Согласно данным СЭМ средний латеральный размер островков составляет около 300 нм, что позволяет рассматривать образование этих островков как начальную стадию формирования двумерного слоя Ge. Следует отметить, что для данной структуры вне области облучения электронным пучком в спектрах КРС пики, связанные с колебаниями Ge-Ge и Ge-Si, не наблюдаются.

Это указывает на отсутствие Ge на поверхности структуры вне области облучения электронами, что подтверждается данными EDX.

Авторы выражают благодарность ЦКП "ВТАН" НГУ и ЦКП "Наноструктуры" ИФП СО РАН за предоставление измерительного оборудования.

## Литература

1. M. Galbiati, N. Motta, M. De Crescenzi *et al.* // Appl. Phys. Rev., V. 6 041310 (2019).
2. S.M. Castillo, Z. Tang, A.P. Litvinchuk *et al.* // Inorg. Chem., V. 55 10203 (2016).
3. В.А. Володин, М.Д. Ефремов, А. С. Дерябин, Л. В. Соколов // ФТП, Т. 40 1349 (2006).

# Группы наноостровков Ge, выращиваемых снаружи от ямок на структурированных подложках Si

В.А. Зиновьев<sup>1</sup>, Ж.В. Смагина<sup>1</sup>, С.А. Рудин<sup>1</sup>, П.Л. Новиков<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090.

\*novikov@isp.nsc.ru

Пространственно-упорядоченные массивы групп квантовых точек (КТ) Ge получены ростом на структурированных подложках Si с глубокими ямками. Выращенные структуры исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и травления фокусированными ионными пучками (ФИП). Данные СЭМ показали, что, в зависимости от периода двумерной решетки ямок, КТ располагаются либо на периферии ямок, либо вдали от ямок между ними, либо равномерно на плоской поверхности. Предполагаемый механизм, определяющий места зарождения КТ, связывается с различной эффективностью ямок в качестве стоков для адатомов Ge в процессе их поверхностной диффузии. Сделанное предположение основывается на результатах моделирования Монте-Карло (МК), учитывающего распределение упругих деформаций в гетероэпитаксиальной системе.

## Введение

Интеграция напряженных квантовых точек (КТ) в полупроводниковые приборы требуют контроля над их размерами и пространственным расположением. Для этой цели используется рост на подложках с ямками, приготовленными с помощью различных методов литографии. Согласно традиционной концепции при соответствующих условиях КТ формируются внутри ямок. Интерес представляют также пространственно-упорядоченные КТ и их группы, располагающиеся между ямками или вокруг них. В частности, массивы таких КТ могут найти применение в двумерных фотонных кристаллах. В нашей предыдущей работе [1] изучались массивы из групп КТ германия, выращенных на кремниевых подложках с глубокими ямками, приготовленными с помощью электронно-лучевой литографии и плазмахимического травления. Было обнаружено, что в зависимости от угла наклона стенок ямок КТ формируются либо на периферии ямок, либо вдали от них. В данной работе изучается расположение КТ в зависимости от расстояний между ямками в массиве.

## Эксперимент

Регулярный массив ямок формировался на подложке Si(001) с помощью электронно-лучевой литографии с последующим плазмахимическим травлением. Для исследований использовались два варианта расположения ямок: с квадратной и с гексагональной двумерными решетками. В обоих вариантах период решетки варьировался от 0.5 до 2 мкм.

Ямки имели цилиндрическую форму с диаметром 100 нм и глубиной 80-100 нм.

Рост Ge производился в камере МЛЭ. Сначала осаждался буферный слой Si толщиной 50-100 нм. Затем осаждалось 4 МС Ge со скоростью 0.05 Å/с при температуре 700 °С. Полученные поверхностные наноструктуры анализировались с помощью микроскопии атомных сил, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), включая травление фокусированным ионным пучком (ФИП) для получения поперечных сечений структур.

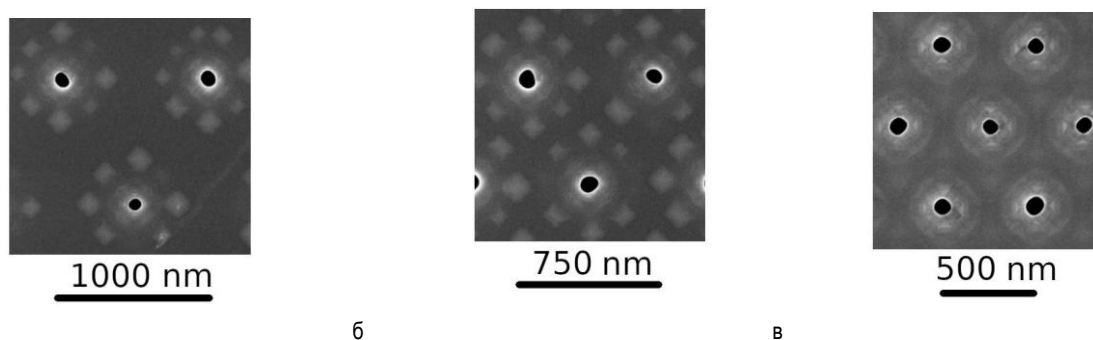
## Моделирование

Процесс роста КТ моделировался методом Монте-Карло (МК) на основе разработанной ранее физической модели [2]. Модель имитирует процесс формирования поверхностных наноструктур в виде последовательности случайных элементарных событий: осаждение атомов, поверхностные диффузионные прыжки и смещения атомов около узлов кристаллической решетки. Вероятность осаждения за одну итерацию пропорциональна заданной скорости роста. Вероятность диффузионного прыжка для некоторого атома экспоненциально зависит от энергии атома, которая в свою очередь содержит отрицательные слагаемые, пропорциональные числу его ближайших и вторых соседей (со своими энергиями активации), и положительное слагаемое, определяющее вклад атома в упругую энергию гетероэпитаксиальной системы, представленной в виде потенциала Китинга [3]. Энергия атома перед прыжком соответствует его равновесному положению.

нию в текущем фиксированном окружении его ближайших соседей. После совершения прыжка атому придается смещение, такое что соответствующая энергия атома подчиняется распределению Больцмана. Организованные таким образом прыжки удовлетворяют принципу детального равновесия: можно показать, что частоты прямых и обратных прыжков относятся, как  $\exp[(E_i - E_f)/kT]$ , где  $E_i$  и  $E_f$  — энергия атома до и после прыжка соответственно.

Вероятность каждого прыжка существенно зависит от упруго напряженного состояния системы.

Поэтому непосредственно перед собственно моделированием роста положение каждого атома обновлялось приблизительно  $10^3$  раз (как будто после совершения прыжка) в соответствии с заданной геометрией кристаллической структуры и температурой.



**Рис. 1.** СЭМ-изображения структур после осаждения Ge для различных периодов в массиве ямок (случай гексагональной двумерной решетки ямок). Период составляет (а): 1000 нм; (б) 750 нм; (в) 500 нм

## Результаты и обсуждение

На Рис. 1 представлены СЭМ-изображения поверхностных наноструктур, полученных на подложках Si(001) с разными расстояниями между ямками в их гексагональном массиве. Видно, что при наибольшем периоде 1000 нм КТ Ge располагаются вокруг ямок. При периоде 750 нм КТ вырастают как вблизи ямок, так и между ними. В случае наименьшего периода 500 нм КТ зарождаются только между ямками, на максимальном от них удалении. Аналогичные закономерности в расположении КТ были получены и на подложках с квадратными массивами ямок. Наша интерпретация наблюдаемого расположения КТ строится на основе механизма роста, выявленного с помощью моделирования МК. Установлено, что во всех случаях в процессе осаждения смачивающего слоя Ge вокруг ямок вблизи них формируются области минимальной упругой энергии. Именно в этих областях выгодно зарождаются 3D островкам в режиме роста Странского-Крастанова. Однако сток адатомов Ge в ямки пре-

пятствует процессу образования nanoостровков. Конкуренция указанных двух факторов определяет места зарождения КТ. В частности, уменьшение расстояния между ямками усиливает их способность поглощать материал, подавляя тем самым образование nanoостровков на периферии ямок.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 21-72-20184). Авторы выражают благодарность ЦКП "ВТАН" НГУ и ЦКП "Наноструктуры" ИФП СО РАН за предоставление измерительного оборудования.

## Литература

1. A. Novikov, Zh. Smagina, M. Stepikhova *et al.* // *Nanomaterials* 11, 909 (2021).
2. S. A. Rudin, V. A. Zinov'ev, A. V. Nenashev *et al.* // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 49, 461 (2013).
3. P. N. Keating // *Phys. Rev.* 145, 637 (1966).



# Доноры лития в объёмных монокристаллических моноизотопных сплавах $^{28}\text{Si}_{(1-x)}^{72}\text{Ge}_x$

И.А. Зубанов<sup>1</sup>, А.А. Ежевский<sup>1</sup>, П.Г. Сенников<sup>2</sup>, Д.В. Гусейнов<sup>1</sup>, А.В. Сухоруков<sup>1</sup>,  
Е.А. Калинина<sup>1</sup>, Н.В. Абросимов<sup>3</sup>, Н.И. Аверина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin 12489, Germany

\* zrehbknhfde99@gmail.com

Методом электронного спинового резонанса исследованы литиевые донорные центры в изотопически очищенных объёмных монокристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,0039-0,05$ ), обогащённых бесспиновыми изотопами  $^{28}\text{Si}$  и  $^{72}\text{Ge}$  (99,998% и 99,984% соответственно) при температурах  $T = 3,5-30$  К. и сравниваются с их поведением в кристаллах Si. Полученные результаты для электронов, локализованных на донорах Li в его основных состояниях, показывают, что, несмотря на нерегулярное расположение атомов Ge в решётке сплава  $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ , наличие в их окрестности локальных искажений и уширение линий электронного спинового резонанса донорных электронов из-за случайного распределения атомов Ge и возникающей из-за них деформации, разрешение в спектрах выше, а линии доноров Li в спектрах становятся уже, по сравнению с кристаллами с природным составом изотопов Si и Ge. Из эксперимента ЭПР показано, что центр лития с тригональной ( $g||[111]$ ) симметрией основного состояния имеет наиболее устойчивую конфигурацию в объёмном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при различных значениях  $x < 5$  ат. % и что скорости спиновой релаксации в интервале температур 4-30 К не подчиняются процессам Орбаха или Рамана, но имеют необычную зависимость  $T^{2\pm\alpha}$ , которая может быть объяснена перекрёстной релаксацией через двухъямный потенциал.

## Введение

В настоящее время сплавы Si и SiGe являются перспективными материалами для квантовых компьютеров [1], где используют спины электронов, локализованных на донорах или заключённых в квантовой точке. Обогащение Si или матрицы SiGe бесспиновыми изотопами приводит к еще более сильной изоляции спинов кубитов от окружения, тем самым значительно увеличивая время спиновой когерентности. Для изучения свойств изотопно очищенных Si и SiGe можно использовать метод ESR с электронами, связанными с мелкими донорами, такими как литий или фосфор, который может дать существенную информацию, поскольку их спины чувствительны к окружению в Si и в SiGe. Мелкие доноры группы V в кремнии обладают схожими электронными свойствами, определяемыми структурой основного состояния электрона  $1s(A_1)$ , которое представляет собой орбитальный синглет. Принципиальной разницы в электрических свойствах кристалла кремния, легированного разными донорами в серии P - Bi, нет. Однако их спины ведут себя по-разному из-за индивидуальных особенностей состояния  $1s$ , различий в плотности электронов и спинов на донорном ядре или окружающих ядрах и спин-орбитальной (SO) связи, которые существенно зависят от индивидуальных

химических свойств донорных атомов. Процессы спиновой релаксации локализованных донорных спинов и электронов проводимости так же существенно зависят от химической природы донора.

## Методика эксперимента

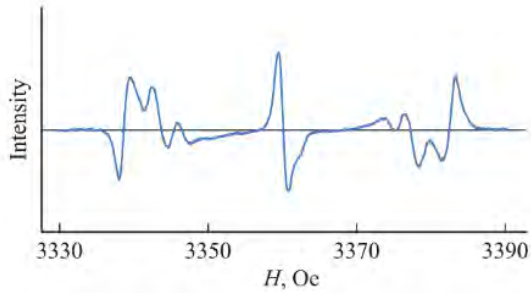
Методика получения монокристаллов  $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$  и дальнейшие операции с ними были описаны ранее в работе [2]. Спектры ЭПР исследовались на спектрометре BrukerEMXplus-10/12 X-диапазона в интервале  $T = 3.5-30$  К (частота 9.6 ГГц).

## Результаты и обсуждение

В изотопически чистых монокристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с  $x = 0,39, 1,2$  и  $2,9$  ат. %, обогащённых бесспиновыми изотопами  $^{28}\text{Si}$  и  $^{72}\text{Ge}$  (99,998% и 99,984% соответственно), мы наблюдали сужение линий ЭПР центров фосфора и лития по сравнению с аналогичными кристаллами с природным составом изотопов Si и Ge. Оно связано со значительным уменьшением вклада в уширение линий от суперсверхтонкого взаимодействия с магнитными ядрами  $^{29}\text{Si}$  и  $^{73}\text{Ge}$ . Как видно на рис. 1, это позволило наблюдать спектры электронов, локализованных на донорах фосфора с хорошо разрешенной сверхтонкой структурой (HFS). Еще более узкие

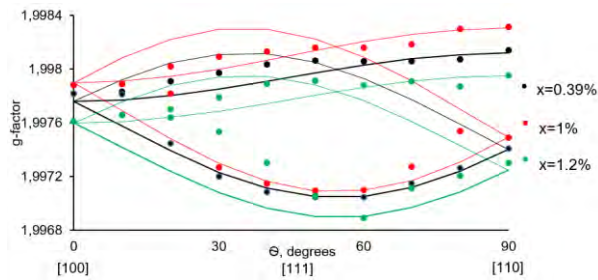


линии ЭПР в центральной части спектра, между сверхтонкими линиями фосфора, были связаны с литием.



**Рис. 1.** Производные сигнала поглощения спектра ЭПР в  $^{28}\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ : Li,  $x = 0.011$ ,  $\theta = 90^\circ$  ( $\text{H} \parallel [011]$ )

Как оказалось, в твёрдом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  донорный центр лития вследствие высокой подвижности занимает наиболее устойчивые междоузельные положения, в которых атомы германия понижают симметрию до аксиальной (тригональной) с осью симметрии [111].

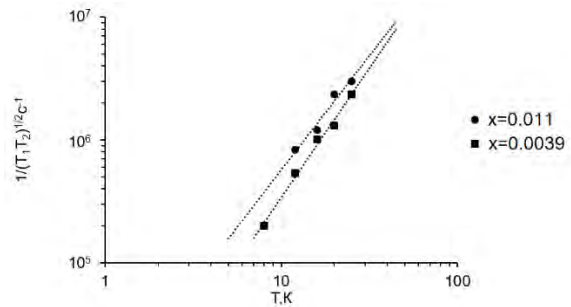


**Рис. 2.** Угловые зависимости положения линий спектра ЭПР в  $^{28}\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ : Li,  $x=0.0039, 0.011, 0.012$  соответственно. Точки — экспериментальные данные, сплошные линии показывают вид теоретических зависимостей

Из рис.2 видно, что значения g-факторов уменьшаются при увеличении концентрации германия, что, по-видимому связано с увеличением спин-орбитального вклада в g-факторы от атомов германия.

Из экспериментов по насыщению спектров ЭПР при  $T=4\div 30\text{K}$  получено (рис.3), что скорость спиновой релаксации электрона, локализованного на до-

норах лития, при низких температурах соответствует модели с участием состояний двухъямного потенциала ( $\frac{1}{T_1} \sim T^2$ ) [3].



**Рис. 3.** Зависимость скорости релаксации от температуры в двойном логарифмическом масштабе для образца  $^{28}\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ : Li,  $x = 0.011$  ( $T^{2.04}$ ) и  $x = 0.0039$  ( $T^{2.18}$ )

Литий может находиться в разных адиабатических состояниях, между которыми существует фононная связь. Фононы индуцируют кросс-релаксационные переходы между зеемановскими подуровнями и состояниями двухъямного потенциала с переворотом спина. Данный механизм релаксации возможен, так как в  $^{28}\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ : Li атомы Ge создают нерегулярную кристаллическую решётку. Германий создает напряженные состояния в центральной ячейке, в которую встраиваются атомы лития. Такой механизм дает существенный канал спиновой релаксации при низких температурах.

### Литература

1. E.M. Hankiewicz, G. Vignale, J. Phys.: Condens. Matter 21, 253202 (2009).
2. Ezhevskii, A.A., Sennikov, P.G., Guseinov, D.V. et al. Behavior of Phosphorus Donors in Bulk Single-Crystal Monoisotopic  $^{28}\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  Alloys. Semiconductors 54, 1123–1126 (2020).
3. Sousa R. Dangling-bond spin relaxation and magnetic 1/f noise from the amorphous-semiconductor/oxide interface // Phys. Rev., 2007. В 76, 245306.

# Радиационная стойкость источника субтерагерцового излучения после нейтронного воздействия

А.С. Иванов<sup>1,\*</sup>, Д.Г. Павельев<sup>2</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,2</sup>, Е.С. Оболенская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПП«Салют», ул. Ларина, д. 7, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603950.

\*ivanov.2582@yandex.ru

Продолжено изучение радиационной стойкости источника субтерагерцового излучения из генератора на диоде Ганна (ГДГ) и умножителя на полупроводниковой сверхрешетке (ППСР) GaAs/AlAs [1] (далее «источник субтерагерцового излучения» — Прим. авт.). Экспериментально измерены зависимости выходной мощности от частоты генератора на диоде Ганна до и после облучения нейтронами. Произведена аналитическая оценка источника субтерагерцового излучения к нейтронному излучению с флюенсами  $3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $2.85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

## Введение

Развитие технологий производства активных полупроводниковых компонентов для компактных, носимых приемопередатчиков субмиллиметрового диапазона с потреблением порядка нескольких ватт расширяет возможности по применению систем космической связи, управления и ориентирования на поле боя. В качестве основы приемопередающего модуля предложен источник субтерагерцового излучения, характеризующийся малыми габаритами, небольшими величинами питающих напряжений. В ряде работ рассматривается радиационная стойкость образующих источника субтерагерцового излучения: объемного диода Ганна (ДГ) [2] и диодов на основе GaAs/AlAs сверхрешеток [3], однако, исследование радиационной стойкости источника субтерагерцового излучения в целом не проводилось.

## Экспериментальная часть

В ГДГ был применен ганновский диод аналогичный 3A763 ЛМ разработки АО НПП «Салют», г. Нижний Новгород. Диод представляет собой полупроводниковый кристалл GaAs диаметром  $\sim 0,1$  мм и толщиной 10...20 мкм, смонтированный на теплоотводящем кристаллодержателе — медном стержне диаметром 1,2 мм и высотой 2 мм. Концентрация носителей составляет  $n_0 \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , размер активной области — 3 мкм. Структура диода — вертикальная, т. е. контакты диода расположены на верхней и нижней грани кристалла. Основная частота подобных диодов лежит в 8-мм диапазоне. Конструкция специально спроектиро-

ванной измерительной камеры, схема измерения зависимостей выходной мощности ДГ от частоты подробно изложены в [4]. Кратко схему измерения характеристик можно описать следующим образом. При подаче напряжения смещения на диод, в камере возбуждались электромагнитные колебания частотой порядка 30 ГГц. СВЧ мощность с выхода камеры поступает по волноводу сечения 3,6x1,8 мм на первичный преобразователь М5-50, преобразуется, и значение уровня выходной мощности отображается на индикаторе измерителя мощности МЗ-22. Измерение частоты генерации производится с помощью частотомера резонансного Ч2-26. Выделение частоты генерации ДГ осуществляется изменением положения подстроечных короткозамыкателей и частотой выходного контура. На шкале индикатора МЗ-22 проявляется в уменьшении в 2–3 раза значения измеряемой мощности. После получения зависимостей выходной мощности сигнала от частоты ДГ были подвергнуты облучению флюенсами нейтронов: ДГ №1 —  $3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , ДГ №2 —  $2.85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , ДГ №3 —  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Спустя 6 месяцев серия измерений проведена для всех изучаемых ДГ.

## Результаты и обсуждение

По результатам измерений рабочих параметров ДГ до и после облучения нейтронами отмечено: для ДГ №1 (рис. 1) отмечено сужение рабочей полосы частот на 30 % в сравнении с параметрами до облучения, для ДГ №2 (рис. 2) — расширение полосы частот на 440 %, для ДГ №3 (рис.3) — расширение на 220 %. После облучения нейтронами наблюдает-

ся уменьшение выходной мощности ДГ практически для всех образцов.

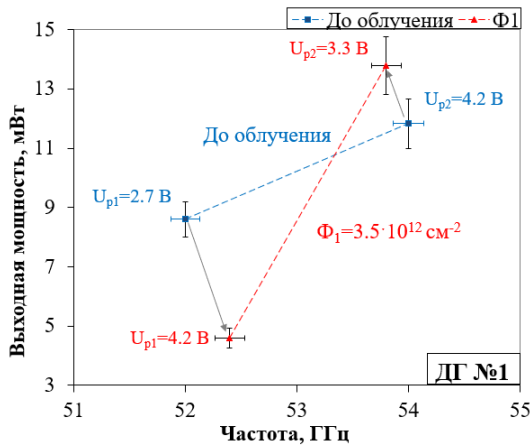


Рис. 1. Зависимости выходной мощности от частоты генерации для ДГ №1

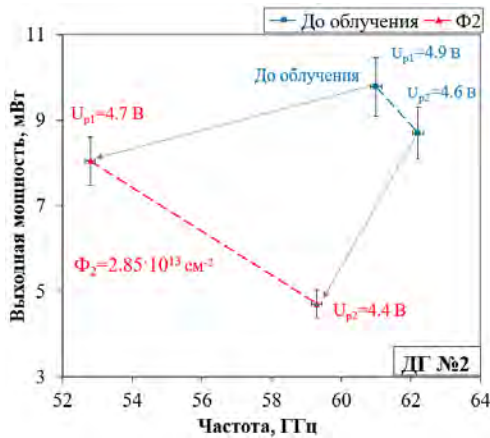


Рис. 2. Зависимости выходной мощности от частоты генерации для ДГ №2

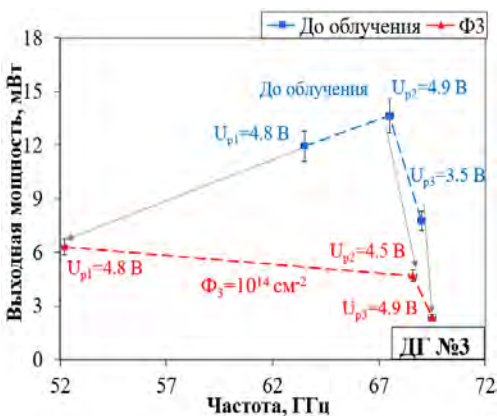


Рис. 3. Зависимости выходной мощности от частоты генерации для ДГ №3

На основе мощностей гармоник умножителя частоты на ППСР в работе [5], полученных зависимостей мощности от частоты для ГДГ возможно оценить

зависимость мощности гармоник от частоты источника субтерагерцового излучения (рис. 4).

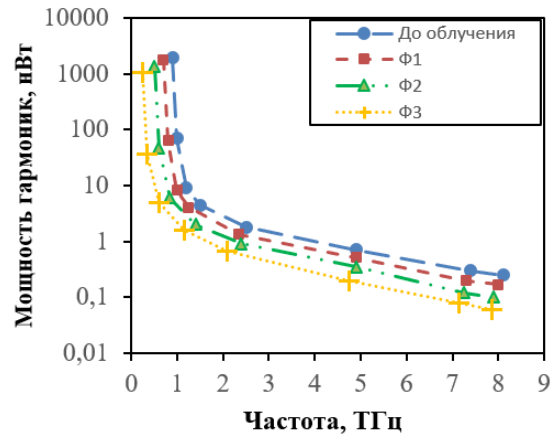


Рис. 4. Зависимость мощности гармоник от частоты генерации источника субтерагерцового излучения при различных флюенсах нейтронов:  $\Phi_1=3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $\Phi_2=2.85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $\Phi_3=10^{14} \text{ см}^{-2}$

В качестве опорной частоты гетеродина была выбрана третья гармоника генератора (3·53,3 ГГц) на ДГ в 160 ГГц. Для флюенса в  $3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в качестве гетеродина был выбран генератор на ДГ №1,  $2.85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  — ДГ №2,  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  — ДГ №3. При облучении гетеродина нейтронами с увеличением флюенса уровень мощности гармоник источника ТГц излучения уменьшается.

На основе измерений рабочих характеристик гетеродина на ДГ и теоретических результатов радиационной стойкости ППСР сделаны выводы о радиационной стойкости к нейтронному облучению источника субтерагерцового излучения в целом.

### Литература

1. А.С. Иванов, Д. Г. Павельев, С. В. Оболенский, Е. С. Оболенская, ЖТФ, **91**(10), 1501 (2021).
2. W. Abd El-Basit, S. M. El-Ghanam, A. M. Abdel-Maksood et al.// NET, **48**, 1219 (2016).
3. Д. Г. Павельев, А. П. Васильев, В. А. Козлов, Е. С. Оболенская ФТП, **52**(11), 1337 (2018).
4. Иванов А. С., Оболенский С. //Тез. докл.3-й Росс.-Бел. конф. 14–15 ноября 2017г., (Нижний Новгород, Россия, 2017) с. 20.
5. А.С. Иванов, Д. Г. Павельев, Ю. И. Кошуринов, А. Н. Панин, В. Л. Вакс, В. И. Гавриленко, А. В. Антонов, В. М. Устинов, А. Е. Жуков. ФТП, **46**(1), 25 (2012).

# Степень поляризации комбинационного рассеяния света в нанокристаллах кремния

А.В. Иго<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет, ул. Льва Толстого, 42, Ульяновск, 432063.

\*igoalexander@mail.ru

В эксперименте исследовано комбинационное рассеяние света (КРС) на массиве ориентированных нанокристаллов кремния. Измерялась угловая зависимость интенсивности поляризованных компонент КРС и определялся параметр степени поляризации рассеянного света. Обнаружено, что степень поляризации КРС связана с размером нанокристаллов в образцах.

## Введение. Угловая зависимость интенсивности КРС в нанокристалле

Комбинационное рассеяние света (КРС) в кристаллах поляризовано. Теория предсказывает, что в некотором определенном направлении  $k^S$  интенсивность рассеянного света  $I$  с поляризацией  $e^S$  определяется тензором КРС образца  $R$ , направлением и поляризацией падающего излучения  $k^I$ , и  $e^I$ .

$$I = A[e^I R e^S]^2$$

В нанокристаллах размера  $L$ , неопределенность значения волнового вектора оптического фонона волновым вектором  $q$  и частотой  $\Omega(q)$ :

$$\Delta q = 2\pi/L$$

проявляется в увеличении ширины спектральной линии

$$\Gamma = \Delta\omega^S = \Omega(q) - \Omega(q + \Delta q)$$

Неопределенность величины  $q$  приводит к неопределенности направления фонона в пространстве обратной решетки. В этом случае, вместо определенного направления можно говорить о направлении в некоторый телесный угол, с плоским углом раствора  $\Delta\gamma$ , а при выходе из образца содержащего нанокристаллы размера  $L$  в геометрии обратного рассеяния (рис. 1) свет будет иметь разброс направлений:

$$\Delta\theta = nKa/L$$

Здесь  $n$  показатель преломления кристалла,  $a$  - постоянная решетки,  $K$  константа близкая к единице. Таким образом, если существует вероятность рассеяния в некоторый телесный угол, ограниченного плоским углом  $\Delta\theta$ , то в направлении  $k^S$  фотоприемник зарегистрирует с усредненную по этому углу интенсивность.

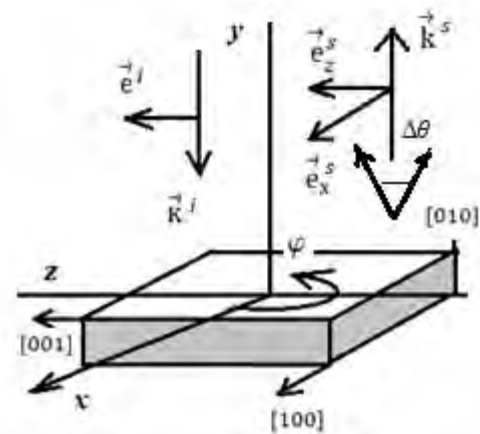


Рис. 1. Геометрия обратного рассеяния КРС

Проводя вычисления получим интенсивности для двух положений анализатора [1]:

$$I_x(\varphi) = A[1 + \eta \cos 4\varphi]$$

$$I_z(\varphi) = A[1 - \eta \cos 4\varphi]$$

$$\eta = \sin(2\Delta\theta)/2\Delta\theta$$

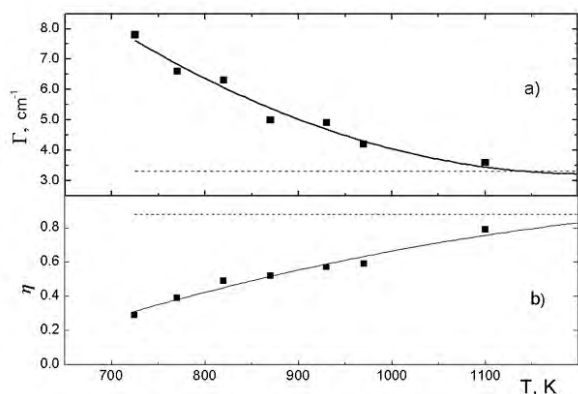
Величина  $\eta$  совпадает с определением степени поляризации излучения для образца. Если ориентировать кристалл по главным осям  $\varphi=0$ , то вращая анализатор максимальная интенсивность излучения совпадает с  $I_{max} = I_x$ , а минимальная с  $I_{min} = I_z$ . В результате получим:

$$(I_{max} - I_{min})/(I_{min} + I_{min}) = \eta$$

## Экспериментальные образцы и результаты измерений

Экспериментальный образец представлял собой монокристаллический кремний, имплантированный ионами углерода дозой  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и энергией ионов  $E=40 \text{ кэВ}$ . После имплантации образец становится аморфным на всю глубину проникновения ионов. При термическом отжиге образца кристалличность слоя восстанавливается не одновре-

менно во всем нарушенном объеме, а в виде нанокристаллов, разделенных аморфными промежутками. Очевидно, что все образованные кластеры имеют одинаковую кристаллографическую ориентацию исходного монокристалла. Размер нанокристаллического кластера в аморфной матрице зависит от температуры отжига. Измерения размеров нанокристаллов методами XRD и КРС [2] показали близкие значения. Нанокристаллы размером 2 нм появлялись в образце при температуре отжига 700 °С. При 800-900 °С размер увеличивался до 6 нм, а при 1000 °С увеличивался до 10 нм.



**Рис. 2.** Зависимость ширины спектральной линии а) и степени поляризации б) от температуры отжига образцов. Пунктирной линией показаны значения для монокристалла

Спектр КРС образца без отжига представляют собой широкий максимум в области 480 см<sup>-1</sup> аморфного кремния, а спектры образцов после отжига имеют спектральные линии КРС кристаллической фазы кремния 520 см<sup>-1</sup>.

В эксперименте исследовалась степень поляризации излучения и измерялась угловая зависимость интенсивности излучения КРС. Исследуемый образец ориентировался по кристаллографическим направлениям как показано на рис.1 и регистрировались три спектра КРС образца с поляризатором и

без, затем образец поворачивался вокруг оси у с шагом 10°. По спектрам определялись интенсивности излучения I, (без поляризатора) I<sub>x</sub>, I<sub>z</sub>. (с поляризатором, ориентированном по осям x и z) Ширина спектральной линии определялась по спектрам, измеренным без поляризатора. Результаты измерений и расчетов представлены на рис.2.

## Заключение

Зависимость а) на рис 2 отражает известный результат, что ширина спектральной линии КРС нанокристаллов увеличивается при уменьшении размера нанокристалла (при меньших температурах отжига). В работе обнаружено, что степень поляризации КРС массива ориентированных нанокристаллов также зависит от размеров нанокристаллов (график б) на рис 2.)

Расчетным путем показано, что образованный термическим отжигом имплантированного образца массив нанокристаллов имеет высокую степень упорядоченности.

В работе предложена методика измерения степени поляризации КРС по измерению угловых зависимостей интенсивности двух поляризованных компонент КРС.

Проведенные расчеты показывают связь степени поляризации КРС с фундаментальным пределом неопределенности направления волнового вектора оптического фонона в нанокристалле. Полученные соотношения позволяют оценивать размер нанокристаллов.

## Литература

1. А.В. Иго// ЖЭТФ. 2020. Т158, № 4. С. 605.
2. А.В. Иго// Опт. и спектр. 2020. Т.129. № 2. С. 1115.



# Рост методом МЛЭ Ван-дер-Ваальсовых материалов на Si(111)

Д.В. Ищенко<sup>1,\*</sup>, И.О. Ахундов<sup>1</sup>, В.А. Голяшов<sup>1,2</sup>, Н.П. Степина<sup>1,2</sup>, А.С. Тарасов<sup>1</sup>,  
Е.В. Федосенко<sup>1</sup>, О.Е. Терещенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090.

\*ischenkod@isp.nsc.ru

В работе приводятся первые экспериментальные результаты, полученные на эпитаксиальных плёнках  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_3$  на подложках Si(111) через буферный слой  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Показано, рост плёнок происходит по послойно-островковому типу. Приведены первые результаты измерений проводимости, эффекта Холла и магнетосопротивления.

## Введение

В течение последнего десятилетия большой интерес вызывают материалы, обладающие свойством топологических изоляторов (ТИ). ТИ — это такие материалы, в которых закон дисперсии на поверхности является линейным, при этом в объёме материал остаётся изолятором. К таким материалам относится соединения  $\text{A}_2\text{B}_3$  ( $\text{A} = \text{Bi}, \text{Sb}, \text{B} = \text{Se}, \text{Te}$ ). В соединениях  $\text{A}_2\text{B}_3$  существует проблема высокой проводимости, обусловленная собственными дефектами, что затрудняет исследования поверхностных топологических состояний. Так, в  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  избыток металла занимает узлы решетки Te и действует как легирующая примесь р-типа. Одним из возможных путей решения данной проблемы является рост тройных и четверных соединений методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Стоит отметить, что работ по росту  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_3$  (BSTS) методом МЛЭ мало, например, [1]. Таким образом, проблема эпитаксии ван-дер-Ваальсовых материалов BSTS является актуальной задачей.

## Эксперимент

Плёнки BSTS были выращены на подложках Si(111) в установке МЛЭ «Ангара». В качестве шихты использовались молекулярные (Bi, Te) и бинарные источники, а также четырехкомпонентный твёрдый раствор BSTS. Основным источником являлся BSTS, молекулярные источники позволяли контролировать тип проводимости и отношение элементов пятой и шестой групп друг к другу.

Подложки Si(111) предварительно обрабатывались по методике «Shiraki» [2]. Затем прогревались до получения картины 7 x 7 и охлаждались до темпе-

ратуры роста. В литературе показано [1], что наиболее совершенные плёнки BSTS получаются при использовании бинарного затравочного слоя. В нашем случае в качестве затравочного слоя использовался слой  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , который выращивался в том же процессе. Скорость роста плёнок варьировалась от  $v \approx 0.3$  нм/мин до  $v \approx 2.5$  нм/мин, температура подложки  $T_{\text{sub}} = 190 - 250$  °C. Контроль толщины получаемых плёнок производился с использованием кварцевого измерителя толщины, качество поверхности контролировалось с помощью дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭ). Определение состава происходило методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

## Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показана фотография картины ДБЭ по окончанию роста плёнки BSTS/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ /Si(111). Видно, что плёнка растёт монокристаллическая.

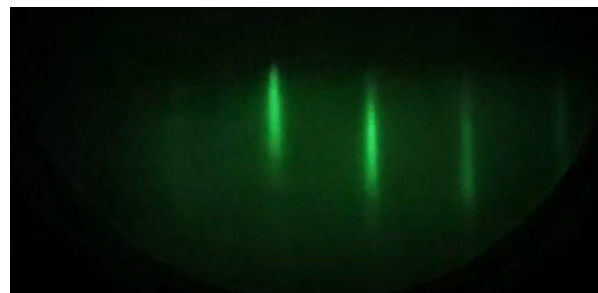
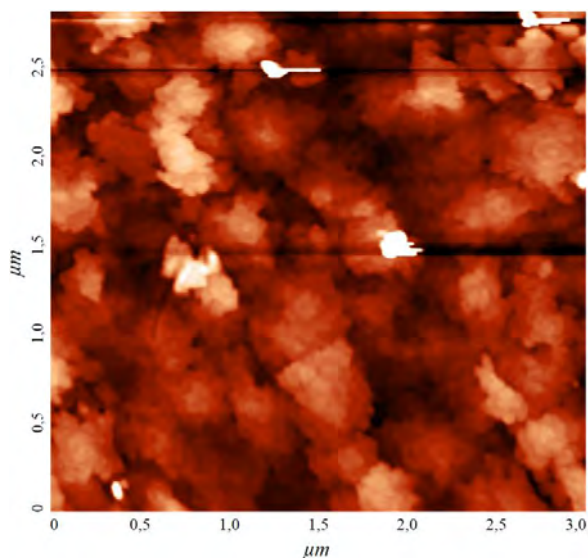


Рис. 1. Фотография картины ДБЭ в конце роста плёнки BSTS/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ /Si(111)

На рисунке 2 представлено АСМ изображение плёнки BSTS/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ /Si(111). Размер скана  $3 \times 3$  мкм<sup>2</sup>, среднеквадратичная шероховатость  $R_q = 2$  нм. Видно, что, во-первых, поверхность состоит из слоёв толщиной 1 нм, что соответствует одному пятиатомному слою, а, во-вторых, рельеф



довольно развитый, что, возможно, связано с особенностями зарождения плёнки.

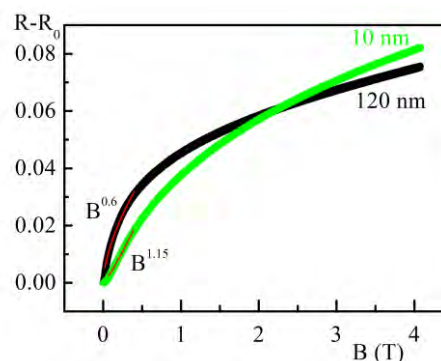


**Рис. 2.** АСМ изображение  $3 \times 3$  мкм<sup>2</sup> поверхности плёнки BSTS/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Si(111) толщиной 10 нм

Состав поверхности плёнки по данным РФЭС: Bi = 38.2%, Sb = 11.5%, Te = 33.1%, Se = 17.2 %.

Было проведено сравнение электрофизических характеристик – проводимости, эффекта Холла и магнетосопротивления (МС) на этой плёнке и плёнке близкого состава, но другой толщины (120 нм). В обеих пленках наблюдается р-тип проводимости с концентрацией носителей заряда порядка  $6-8 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Подвижность в тонкой пленке несколько выше ( $\sim 60$  см<sup>2</sup>/В·с) по сравнению с  $25$  см<sup>2</sup>/В·с для пленки толщиной 120 нм. На рисунке 3 приведены данные магнетосопротивления для рассматриваемых пленок и аппроксимация низкополевой части степенной зависимостью. Видно, что в обоих случаях наблюдается положительное МС, которое можно описать в рамках эффекта слабой антилокализации в соответствии с формулой Хиками [3]. Результаты аппроксимации позволили определить длины фазовой когерентности,  $L_i \sim 143$  нм для толстой пленки и  $\sim 49$  нм для тонкой. Экспериментальные данные проанализированы в рамках модели [4], согласно которой степенная зависимость сопротивления от магнитного поля  $\sim \sqrt{B}$  соответствует эффекту слабой антилокализации,

определяемому трехмерными носителями заряда. Именно корневая зависимость наблюдается для пленки толщиной 120 нм. В тонкой пленке в малых полях наблюдается линейная зависимость сопротивления от магнитного поля.



**Рис. 3.** Магнетосопротивление пленок BSTS толщиной 10 и 120 нм. Линии- аппроксимация степенной зависимостью

Дальнейшие эксперименты будут направлены на получение компенсированных пленок BSTS с положением уровня Ферми в запрещенной зоне, на изучение электронной и спиновой структуры, а также спин-зависимого транспорта в поверхностных состояниях.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность П.А. Кучинской за получение картин АСМ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-22-20074 и РФФИ 21-52-12024.

## Литература

1. T. Mayer, H. Werner *et al.* // *Physical Review Materials*, V. 5, 014202 (2021).
2. A. Ishizaka, Ya. Shiraki // *Journal of the Electrochemical Society*, V. 133, P. 666 (1986).
3. S. Hikami, A. Larkin, Y. Nagaoka // *Progr. Theoret. Phys.* V. 63, 707 (1980).
4. Sumit Bera *et al.* // *AIP Conference Proceedings*, V. 1953, 030122 (2018).

# Оптимизация буферного диэлектрического слоя для создания малодефектных эпитаксиальных пленок топологического изолятора $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с $x \geq 0.4$

А.К. Кавеев<sup>1,\*</sup>, О.Е. Терещенко<sup>2,3</sup>

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

2 Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

3 ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, Кольцово, 630559.

\*kaveev@mail.ioffe.ru

В настоящей работе проведена оптимизация ростовых условий буферного слоя для дальнейшего нанесения  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $x \geq 0.4$ ), обладающего свойствами кристаллического топологического изолятора. Для этого на поверхности Si(111) была сформирована и оптимизирована трехкомпонентная гетероструктура, состоящая из слоев  $CaF_2$ ,  $BaF_2$  и  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$ . Исследована морфология поверхности данной структуры в зависимости от температурных режимов роста и подобрано оптимальное сочетание ростовых параметров с точки зрения гладкости и кристаллического качества.

## Введение

Кристаллические ТИ на основе соединения  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  являются многообещающими с точки зрения практических приложений [1], в силу возможности создания ТИ с менее шунтирующим проводимостью топологических состояний объемом за счет возможности управления составом (значением  $x$ ), в отличие от уже ставших классическими ТИ на основе соединений  $V_2VI_3$ . Помимо контроля состава не менее важно получение малодефектных пленок  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , также с точки зрения уменьшения шунтирующего влияния объема. Данная задача является нетривиальной в силу возникающих при эпитаксиальном выращивании  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  проблем. Для обеспечения наличия проводящих топологических состояний необходимо получить планарный слой, обладающий высоким кристаллическим качеством.

## Полученные результаты и обсуждение

В настоящей работе проведена оптимизация буферного слоя для дальнейшего нанесения  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $x \geq 0.4$ ), обладающего топологическими свойствами. Для этого на поверхность Si(111) наносилась многослойная структура, состоящая из слоев  $CaF_2$ ,  $BaF_2$  и  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$ . Известно, что для эпитаксиального выращивания пленок  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  на кремнии использовались бинарные буферные слои  $BaF_2/CaF_2/Si(111)$  [2]. Вместе с тем, высота рельефа поверхности полученных буферных слоев

была слишком велика в силу недостаточной оптимизации ростовых параметров и дефектности этих слоев.

Известно [3], что фторид кальция при нанесении на поверхность (111) кремния методом молекулярно-лучевой эпитаксии формирует слои высокого кристаллического качества, но различной морфологии поверхности, в зависимости от температуры нанесения. Возможно образование островков различной высоты и латерального размера. В настоящей работе было необходимо обеспечить наиболее гладкую поверхность. Для этого варьировались температурные режимы и толщины слоя фторида кальция. Далее на поверхность фторида кальция наносился слой фторида бария, обеспечивающий более плавный переход по постоянной решетки от  $CaF_2$  к  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ .

На Рис. 1 (а-ж) приведен ряд картин атомно-силовой микроскопии гетероструктуры  $BaF_2/CaF_2/Si(111)$  различной конфигурации. Был определен ряд параметров, обеспечивающих сочетание малых толщин флюоритовых подслоев (что обеспечивает их малую дефектность) с их высокой гладкостью. Показано, что при уменьшении температуры роста фторида кальция и фторида бария происходит уменьшение латеральных размеров островков. Наиболее гладкий рельеф поверхности достигается при пониженных температурах роста ( $250^\circ C$ ). Это коррелирует с результатами работы [4], где была продемонстрирована высокая планар-

ность пленок фторида кальция толщиной единицы нанометров, нанесенных при данной температуре.

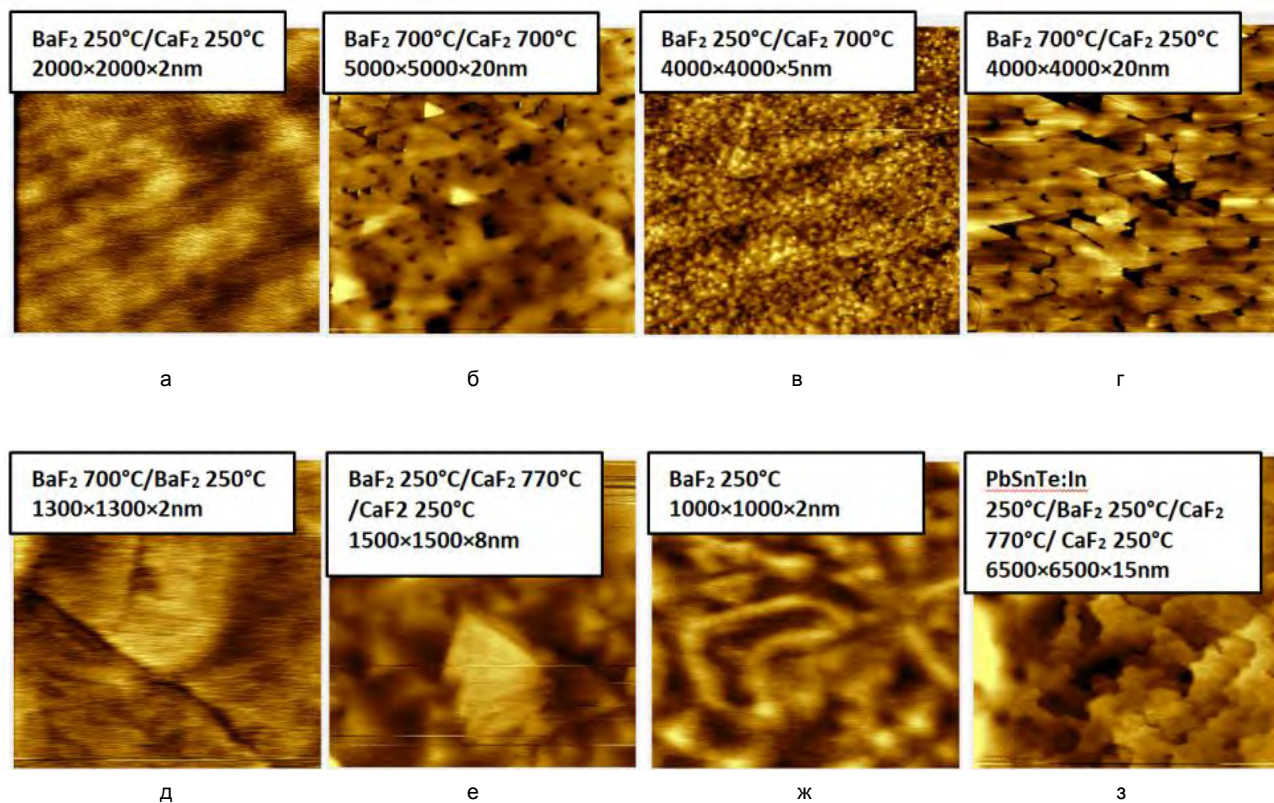
Попытки повысить температуру роста одного из двух подслоев с целью улучшения кристаллического качества приводят к укрупнению островков и закруглению рельефа, что нежелательно для поставленной в работе задачи получения максимально гладких слоев. Также иногда возможно образование трещин в пленке из-за разницы температурных коэффициентов расширения. Вместе с тем, достаточно гладкий рельеф также получается при использовании двухстадийного (пониженная и повышенная температуры) роста фторида кальция, с последующим низкотемпературным нанесением слоя фторида бария (Рис. 1(е)).

Вместе с тем, непосредственное нанесение тонкого слоя  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  на двуслойку не обеспечивает достаточной гладкости и достаточного кристаллического качества для формирования топологических

состояний. Хорошее качество возможно достичь лишь с помощью гомоэпитаксиального наращивания данного материала на достаточно толстый подслоя. При этом необходимо также добиться низкой проводимости этого подслоя путем его легирования, обеспечивающего регулировку положения уровня Ферми.

Проведенные эксперименты с флюоритовыми двуслойками позволили перейти к экспериментам с нанесением третьего буферного подслоя - диэлектрического  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$ . Этот подслоя был выращен при различных температурах – от 250 до 450°C (Рис. 1(з) и Рис. 2).

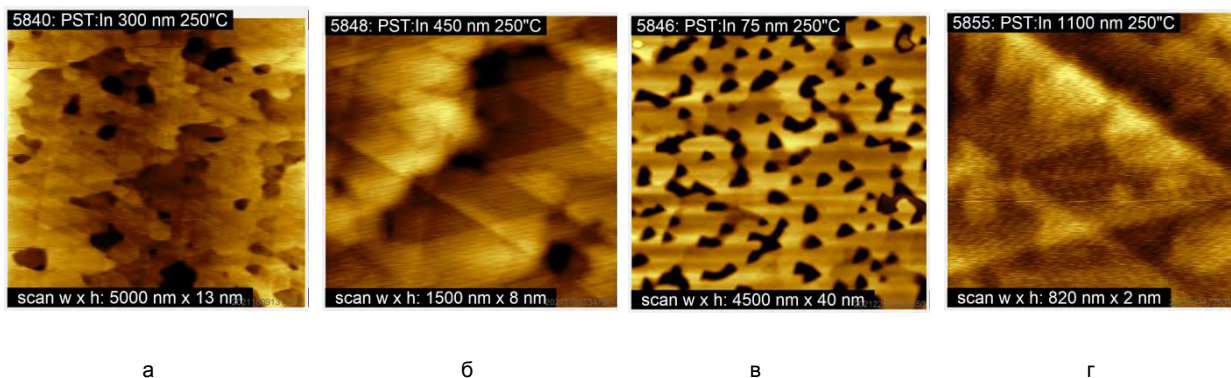
Проведенные эксперименты также показали важность нанесения больших (более 500 нм) толщин этого подслоя для обеспечения его сплошности, отсутствия дыр в пленке, и достижения высокой планарности поверхности.



**Рис. 1.** Морфология поверхности буферного слоя  $BaF_2/CaF_2$  (а-ж), выращенного при различных условиях, и оптимизированной буферной трехслойки  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In/BaF_2/CaF_2/Si(111)$  (з). (а-г) – толщина  $BaF_2$  и  $CaF_2$  20 и 10 нм, соответственно. Толщины слоев: (д) – 10 и 3 нм, (е) – 15, 7 и 3 нм, (ж) – 20 нм, (з) – 300, 15, 7 и 3 нм

На Рис. 2 показаны примеры морфологии поверхности третьего буферного подслоя, полученного при различных условиях. Диэлектрические свойства данного подслоя будут измерены на следующем этапе работы путем проведения электрофизи-

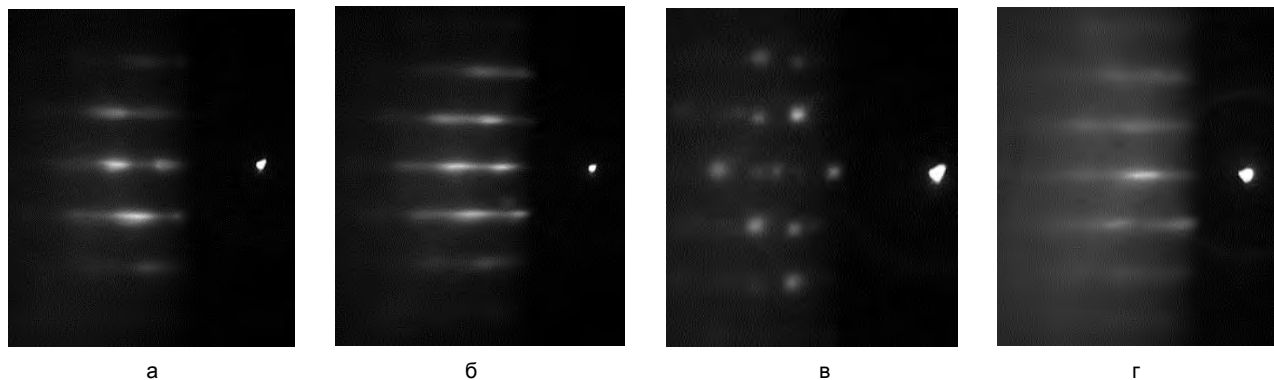
ческих измерений. В дальнейшем на данный под-слой будут нанесены тонкие (10-20 нм) слои стехиометрии, близкой к  $Pb_{0.6}Sn_{0.4}Te$ , с избытком Sn, обеспечивающие наличие проводящих топологических состояний.



**Рис. 2.** Морфология поверхности третьего буферного подслоя  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$  в зависимости от условий роста. (а) – нанесение на двуслойку  $BaF_2$  и  $CaF_2$  с параметрами, соответствующими Рис. 1 (е); (б) – то же, но более тонкий слой  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$ ; (в) – нанесение на двуслойку  $BaF_2$  и  $CaF_2$  с параметрами, соответствующими Рис. 1 (а); (г) – то же, но более тонкий слой  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$ , и при более низкой температуре

Эволюция поверхности по мере формирования трехступенчатого буферного слоя была исследова-

на *in situ* с помощью дифрактометрии быстрых электронов (ДБЭ).



**Рис. 3.** Изменение картин ДБЭ при нанесении 10 нм фторида кальция (а), 15 нм фторида бария (б), и 1000 нм  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$  в начальный момент (в) и в конечный момент (г) роста при температуре 250°C

На Рис. 3 показано изменение картин ДБЭ при последовательном нанесении 10 нм фторида кальция (а), 15 нм фторида бария (б), и 1000 нм  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$  в начальный (в) и в конечный момент (г) роста при температуре 250°C. Видно, что фториды кальция и бария растут планарно, о чем свидетельствуют тяжи на картинах ДБЭ. Далее, на начальном этапе роста происходит трехмерный (островковый) рост  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te:In$ . Двойникование рефлексов свидетельствует о двухдоменном харак-

тере роста, характерном для кубической кристаллической решетки с ростовой поверхностью (111). В ранее проведенной нами работе [5] были проведены пробные эксперименты по нанесению тонких пленок  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$  на  $Si(111)$  с использованием буферного подслоя фторида кальция. Были установлены эпитаксиальные соотношения относительно кремния:  $(111) Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te \parallel (111) Si$ ,  $[2\bar{1}\bar{1}] Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te \parallel [2\bar{1}\bar{1}] Si$ . В настоящем случае эти соотношения, очевидно, сохраняются.



С увеличением толщины наносимого материала точечные рефлексy сменяются тяжами, что говорит о срастании островков (режим роста Странского-Крастанова) и образовании гладкой поверхности. Данная картина ДБЭ (Рис. 3(г)) находится в соответствии с Рис. 2 (г), где действительно продемонстрирована гладкая поверхность с характерными линиями под углом  $60^\circ$ , которые являются выходами дислокаций, также характерными для ростовой поверхности (111) кубической кристаллической решетки.

## Выводы

В результате настоящей работы перебран ряд ростовых режимов и оптимизированы ростовые параметры для трехслойной эпитаксиальной гетероструктуры  $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}:\text{In}/\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ . Показана возможность планарного малодефектного роста третьего подслоя -  $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}:\text{In}$ , необходимого для дальнейшего гомоэпитаксиального наращивания  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  с увеличенным значением параметра

$x \geq 0.4$  с целью получения поверхностных топологических состояний.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-52-12024.

## Литература

1. T. H. Hsieh, H. Lin, J. Liu, W. Duan, A. Bansil & L. Fu // *Nature Communications*, V. 3, 982, (2012).
2. A. N. Akimov, A. V. Belenchuk, A. E. Klimov *et al.* // *Technical Physics Letters*, V. 35, N.6, 524, (2009).
3. C.A. Lucas, D. Loretto, and G.C.L. Wong // *Physical Review B*, V. 50, N.19, 14340 (1994).
4. Y. Y. Illarionov, A. G. Banshchikov, D. K. Polyushkin *et al.* // *Nature Electronics*, V. 2, 230, (2019).
5. А.К. Кавеев, Д.Н. Бондаренко, О.Е. Терещенко // *Физика и техника полупроводников*, том 55, вып. 8, стр. 625, (2021).

# Оптика спиральных нанотрубок на основе MoS<sub>2</sub>

Д.Р. Казанов<sup>1,\*</sup>, А.В. Пошакинский<sup>1</sup>, И.А. Елисеев<sup>1</sup>, Б.Р. Бородин<sup>1</sup>, С.И. Павлов<sup>1</sup>, Т.В. Шубина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*kazanovdr@gmail.com

Исследовано поведение оптических мод в спиральных нанотрубках на основе MoS<sub>2</sub> вблизи непрямого экситонного перехода. Спектры микро-ФЛ таких нанотрубок содержат пики, связанные с модами шепчущей галереи, которые расщепляются при увеличении степени сплюсненности поперечного сечения нанотрубки и изменяют интенсивность вдоль оси трубки. Численное моделирование показало, что оптические моды, двукратно вырожденные в цилиндрических нанотрубках, расщепляются при деформации сечения, тогда как спиральность нанотрубок, отвечающая за поворот сечения трубки по отношению к падающему свету, влияет на степень перекрытия между падающим полем и оптическими модами, что определяет интенсивность расщепленных оптических мод.

## Введение

Фундаментальные исследования в области микро-резонаторов, которые могут поддерживать моды шепчущей галереи (МШГ) представляют интерес из-за ряда возможных практических применений [1]. Наиболее распространенными являются микро-резонаторы с цилиндрической симметрией — диски, наноклонки и трубчатые структуры. В последнее время привлекают внимание нанотрубки, созданные из дихалькогенидов переходных металлов (MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>), стенки которых связаны друг с другом слабыми силами Ван-дер-Ваальса [2, 3]. Исследования этих трубок показало, что они обладают нетривиальными оптическими свойствами [4]. Многостенные микро- и нанотрубки на основе MoS<sub>2</sub> содержат в своих оптических спектрах как прямой (~ 2 эВ), так и непрямой (~ 1.3 эВ) экситонные переходы. Кроме того, нами было показано, что они могут вести себя как микрорезонаторы, поддерживающие МШГ внутри стенок толщиной несколько десятков нм [5]. Сечение таких трубок представляет собой кольцо с цилиндрической симметрией, за счет чего оптические моды шепчущей галереи внутри стенки трубки двукратно вырождены по энергии [6]. Спектры излучения таких трубок содержат набор линейно поляризованных вдоль оси нанотрубки пиков МШГ с различными азимутальными номерами  $m$ .

В общем случае нанотрубки могут не обладать цилиндрической симметрией. Понижение симметрии трубки может быть вызвано как внешними воздействиями, так и спецификой процесса их газофазного роста [3]. В сплюсненной трубке, в первом приближении имеющей сечение в виде эллипса или

«гоночной трассы», ожидается расщепление двукратно вырожденных мод, характерных для цилиндрических резонаторов. Кроме того, ожидается, что взаимодействие света с оптическими модами зависит не только от номера моды, но и от пространственного расположения области, где мода квантуется. По этой причине поворот плоскости сечения нанотрубки должен изменять степень взаимодействия между падающим светом и оптическими модами.

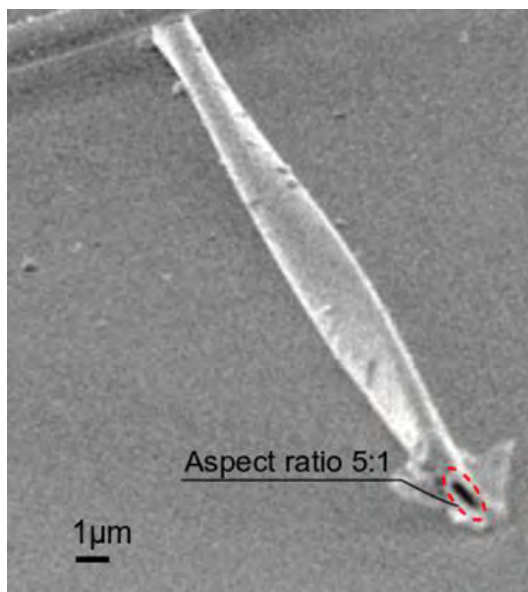
В данной работе мы изучаем влияние нарушения цилиндрической симметрии в спиральных нанотрубках на основе MoS<sub>2</sub>, в которых реализуется циклическое изменение энергии и интенсивности пиков МШГ в спектрах излучения. Результаты численных расчетов показывают, каким образом степень сплюсненности сечения и его поворот вдоль оси нанотрубки может влиять на спектры микро-ФЛ, регистрируемые вдоль оси подобных нанотрубок.

## Экспериментальные исследования

Исследуемые нанотрубки на основе MoS<sub>2</sub> были исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) для выяснения реальных геометрических размеров. На рисунке 1 представлено СЭМ изображение исследуемой трубки на основе MoS<sub>2</sub>, показывающее, что сечение трубки вращается вдоль ее оси по спирали и меняет свою форму. Торцы нанотрубки сильно сплюснены и представляют из себя сечение, близкое к эллипсоидальному (типа gate track - «гоночная трасса»). Для доказательства того, что поперечное сечение трубки действительно деформировано, был проведен до-



полнительный анализ СЭМ в зависимости от угла падения электронного луча.

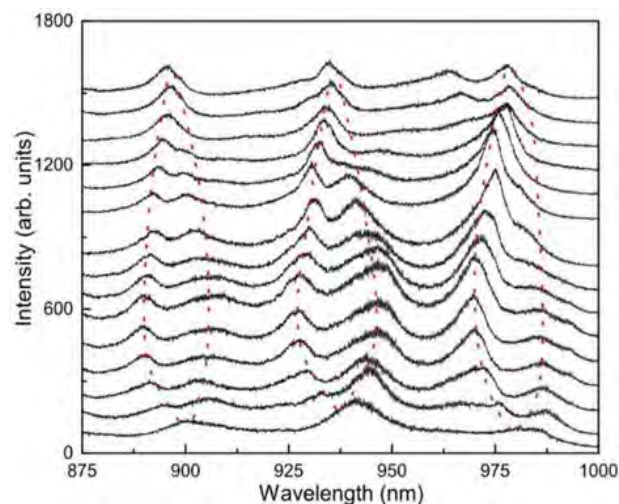


**Рис. 1.** Пример изображения сканирующей электронной микроскопии нанотрубок. Красным помечено поперечное сечение трубки, которое сплющено и представляет из себя подобие эллипса. Наблюдается спиральность трубки вдоль ее оси, реализуемая поворотом сечения

Отмечено, что степень сплюснутости плавно меняется вдоль оси трубки. На длинных нанотрубках наблюдалась цикличность такого изменения, соответствующая периоду спиральности. Максимальное соотношение между большой,  $a$ , и малой,  $b$ , осями поперечного сечения в исследуемых трубках было порядка 5:1. Характерные размеры осей трубки в области максимальной сплюснутости:  $a \sim 2000$  нм,  $b \sim 400$  нм; толщина стенок  $\sim 100$  нм.

Спектроскопия микро-ФЛ проводилась при комнатной температуре при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм и диаметром пятна  $\sim 1$  мкм. На рисунке 2 изображены спектры ФЛ вблизи непрямого экситонного перехода, измеренные в разных точках нанотрубки вдоль ее оси (для наглядности спектры сдвинуты по шкале интенсивности на одинаковое расстояние). Спектры излучения содержат пики, связанные с возбуждением МШГ внутри стенки нанотрубки.

Наблюдается плавное последовательное расщепление и объединение пиков по мере смещения пятна возбуждения вдоль оси трубки (красные пунктирные линии). Кроме того, происходит перераспределение интенсивности расщепленных оптических мод при повороте плоскости сечения трубки относительно ее оси.



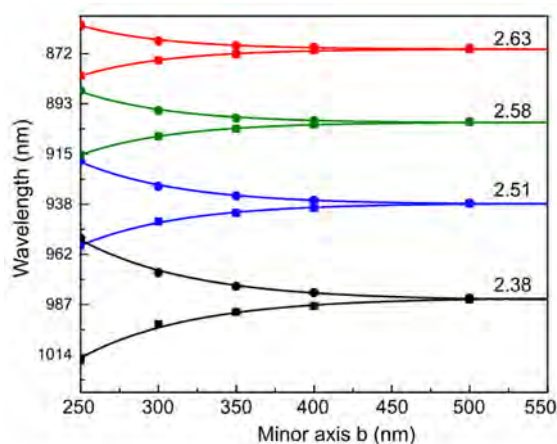
**Рис. 2.** Спектры микро-ФЛ нанотрубки, показанной на рисунке 1, измеренные вдоль ее оси. Спектры из разных точек на оси трубки сдвинуты по оси Y относительно друг друга для наглядности. Красными линиями показано циклическое расщепление/объединение оптических мод в зависимости от положения пятна лазерного возбуждения на оси нанотрубки

Необходимо отметить, что перераспределение интенсивности в соседних расщепленных мод находится в противофазе. Таким образом, в спиральных нанотрубках экспериментально было обнаружено наличие двух эффектов: расщепление оптических мод и перераспределение интенсивности в расщепленных оптических модах. Для их объяснения был проведен ряд численных расчетов с целью описания взаимодействия света с оптическими модами.

### Численное моделирование оптических свойств спиральных нанотрубок

Для поиска энергии собственных мод распространяющихся внутри стенки сплюсненного резонатора с сечением типа «гоночная трасса» проводилось численное моделирование с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics. Геометрические размеры выбирались с учетом результатов характеристики СЭМ, соотношение сторон варьировалось для достижения согласования между экспериментальными данными микро-ФЛ. На рисунке 3 показан график зависимости длины волны оптических мод внутри стенки нанотрубки вблизи непрямого экситонного перехода в зависимости от размера малой оси сплюсненного поперечного сечения при постоянном периметре (это эквивалентно степени сплюснутости сечения). При слабой степени сплюснутости, которая соответствует раз-

меру малой оси  $b > 500$  нм наблюдаются одиночные двукратно вырожденные оптические моды.

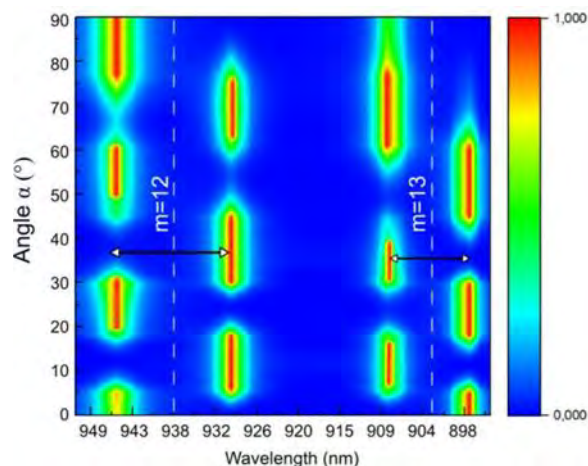


**Рис. 3.** Зависимость длины волны оптических мод от степени сплюсненности поперечного сечения. Все расчеты проводились при постоянном периметре нанотрубки (~ 6 мкм). Каждая мода характеризуется своим эффективным показателем преломления,  $n$ , приведенном на графиках

При увеличении степени сплюсненности (уменьшении  $b$ ) происходит взаимодействие вырожденных мод за счет «вытекания» хвостов оптических мод из стенки нанотрубки по аналогии с расщеплением уровней размерного квантования в двойных квантовых ямах при их приближении друг к другу или расщеплением двух связанных резонаторов [7]. Частота такого расщепления может быть представлена в виде

$$\omega = \omega_0(1 \pm te^{-\kappa b}), \text{ где } \kappa = \frac{\omega}{c} \sqrt{n^2 - 1}.$$

Здесь,  $\omega_0$  — частота двукратно вырожденной моды,  $t$  — параметр, отвечающий за силу взаимодействия,  $\kappa$  — радиальная компонента волнового вектора оптической моды. Каждая оптическая мода может быть охарактеризована своим эффективным показателем преломления  $n$ , который связан со степенью вытекания данной моды за пределы стенки нанотрубки. Чем больше длина волны оптической моды, тем большая часть данной моды сосредоточена в окружающей среде, вне стенки нанотрубки. Это обеспечивает взаимодействие оптических мод, в первую очередь в близко расположенных стенках нанотрубки, параллельных длинной оси  $a$ . В результате происходит все более сильное расщепление ранее вырожденных мод, проявляющееся в изменении энергии пиков. Этот эффект отчетливо наблюдается в расчетных зависимостях на рисунке 3 для оптических мод с большей длиной волны в окрестности непрямого экситона.



**Рис. 4.** Зависимость интенсивности ФЛ (показано цветом) от угла поворота поперечного сечения нанотрубки по отношению к падающему свету в спектральном диапазоне вблизи непрямого экситонного резонанса. Для расчета выбрана степень сплюсненности 5:1. Интенсивность пар оптических мод осциллирует в зависимости от изменения угла в противофазе. Осцилляции пар с соседними угловыми номерами происходит в противоположном направлении

Таким образом, циклическое изменение энергии пиков мод в спектрах микро-ФЛ, приведенных на рисунке 2, может быть обусловлено сплюсчиванием сечения нанотрубки, степень которого изменяется вдоль ее оси.

Для моделирования эффекта перераспределения интенсивности пиков нами была рассмотрена модель, позволяющая описать интенсивность мод в зависимости от угла поворота сечения трубки по отношению к падающему свету. Для этого было промоделировано рассеяние падающего света на деформированном трубчатом резонаторе в зависимости от угла поворота поперечного сечения. Спектры излучения определялись по аналогии с подходом, развитым в [4], использующем принцип взаимности Лоренца. В этом случае локальная интенсивность ФЛ определяется перекрытием поля падающей плоской волны с оптической модой, возбуждаемой в нанотрубке. Это перекрытие изменяется при изменении угла поворота по отношению к падающему полю, причем оно будет разным для двух расщепленных мод.

На рисунке 4 показан пример расчета интенсивности ФЛ вблизи непрямого экситонного перехода в зависимости от угла поворота по отношению к падающему свету. В этом спектральном диапазоне наблюдаются две МШГ характеризуемые азимутальными номерами 12 и 13, расщепленные за счет высокой степени сплюсненности нанотрубки, соот-

ветствующей соотношению осей 5:1. При рассмотрении пары расщепленных мод с одинаковым номером мы наблюдаем противофазное чередование максимумов и минимумов при изменении угла поворота, которое связано с разным интегральным перекрытием падающей волны и оптической моды внутри стенки нанотрубки. Такое чередование изменяется на противоположное для соседней пары расщепленных пиков за счет противоположной симметрии распределения электрического поля внутри стенки по отношению к углу наклона падающего света.

Таким образом, методом спектроскопии микро-ФЛ были изучены оптические свойства спиральных нанотрубок MoS<sub>2</sub>, форма поперечного сечения которых была установлена СЭМ. Проведено численное моделирование наблюдаемого эффекта расщепления/объединения оптических мод в зависимости от степени сплюсненности сечения. Показано, что данный эффект сильнее выражен для более длинных волн, в окрестности непрямого экситона. Описано перераспределение интенсивности оптических мод в зависимости от угла поворота сечения. В целом продемонстрировано хорошее согласие результатов расчета с экспериментальными спектрами микро-ФЛ. Зависимость проявлений МШГ от формы нанотрубок представляет интерес

для тонкой подстройки резонаторных свойств трубчатых структур.

## Благодарности

Работа выполнялась при частичной поддержке проекта РФФ №19-12-00273. Д.К. и А.П. выражают благодарность, стипендии Президента РФ СП-5068.2022.5 и гранту Президента РФ МК-4191.2021.1.2, соответственно.

## Литература

1. K.J. Vahala, *et al.* // *Nature*, 424, 839-846 (2003).
2. M. Remškar, Z. Skraba, F. Cléton, *et al.* // *Appl. Phys. Lett.*, 69, 351 (1996).
3. M. Remskar, A.K. Hüttel, T.V. Shubina *et al.* // *Isr. J. Chem.*, 61, 1 (2021).
4. T.V. Shubina, M. Remškar, V.Y. Davydov, *et al.* // *Ann. Phys.*, 531, 1800415 (2019).
5. D.R. Kazanov, A.V. Poshakinskiy, V. Y. Davydov *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 113, 101106 (2018).
6. M.R. Foreman, J.D. Swaim, and F. Vollmer *et al.* // *Adv. Opt. Photon.*, 7, 632-634 (2015).
7. X.Yi, Y.-F. Xiao, Y.-C. Liu *et al.* // *Phys. Rev. A*, 83, 023803 (2011).

# Формирование эпитаксиальных слоев InGaN для источников видимого красного и ИК диапазонов методом ПА МПЭ на сапфире

М.А. Калинин\*, Д.Н. Лобанов, Б.А. Андреев, К.Е. Кудрявцев, П.А. Юнин, Е.В. Скороходов, А.В. Новиков, З.Ф. Красильник

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*kalinnikov@ipmras.ru

В работе представлены результаты исследований особенностей формирования и фотолюминесценции эпитаксиальных слоев InGaN с содержанием  $50\% < \text{In} < 100\%$ , выращенных на GaN/AlN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом ПА МПЭ. Продemonстрировано, что с уменьшением содержания [In] в слоях InGaN усиливаются процессы спиноподального распада, что приводит к деградации структурных и оптических свойств этих слоёв.

## Введение

Нитрид индия-галлия (InGaN) является прямозонным полупроводниковым материалом. Изменение содержания In в твердом растворе InGaN позволяет варьировать ширину запрещенной зоны от 0.65 эВ до 3.4 эВ, что дает возможность для создания оптоэлектронных устройств работающих в спектральном диапазоне от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного (ИК). Однако InGaN является термодинамически нестабильным твердым раствором для которого характерны такие явления как термическое разложение, спиноподальный распад и сегрегация In [1]. В настоящее время технология роста эпитаксиальных слоев InGaN успешно развита только для составов с высоким содержанием Ga, которые уже стали основой современных синих светодиодов (СД) и лазерных диодов (ЛД). Для продвижения в красную и ИК область спектра необходимо развитие технологии формирования высококачественных структур на основе InGaN с содержанием  $50\% < \text{In} < 100\%$ , которая до сих пор представляет сложную задачу и нуждается в систематическом исследовании влияния ростовых параметров, как на процессы фазового распада, так и на общий уровень структурного качества получаемых слоёв InGaN.

## Методика эксперимента

Рост эпитаксиальных слоев InGaN проводился на подложках c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом МПЭ ПА на установке STE 3N3 (ЗАО "НТО"). На сапфировых подложках диаметром 2" со слоем Ti толщиной 400 нм, нанесенным на обратную сторону, последовательно выращивались высокотемпературные буферные

слои AlN (200 нм) и GaN (700 нм), при температурах 820 и 710 °С соответственно. Далее осуществлялся рост слоя InGaN, с содержанием [In] 50 – 100% в азотобогащенных условиях (III/V ~ 0.9). Рост слоев InGaN разного состава проходил при температурах роста T<sub>g</sub> ~ 470 °С. Рост In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N дополнительно проводился при T<sub>g</sub> ~ 380-470 °С. Толщина InGaN слоёв составляла ~ 700 нм. Выращенные образцы исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгенодифракционного анализа (РДА), фотолюминесценции (ФЛ) и эффекта Холла.

## Результаты и обсуждение

Исследования методами СЭМ сколов структур с слоями InGaN показывают, что все слои обладают развитой морфологией поверхности, типичной для структур, выращенных в азотобогащенных условиях из-за уменьшения подвижности адатомов. Исследования методами РДА показали, что все слои InGaN являются полностью релаксированными. В образцах с содержанием [In] = 60-100% при выбранных условиях роста наблюдался один симметричный пик в спектрах РД (рис. 1). Тем не менее, ширина РД отражения (0004) от InGaN увеличивалась с уменьшением содержания [In], что может говорить как об ухудшении кристаллического качества, так и о возможном увеличении флуктуаций состава (таб. 1). В образце со слоем InGaN, с содержанием [In] ~ 50%, наблюдается резкое увеличение ширины РД отражения (0004) (таб. 1). Также это отражение становится несимметричным (появляется плечо – фаза другого состава), и наблюдаются отражения от бинарного InN и даже металли-

ческого In. Всё это указывает на начало фазового распада в InGaN слое с содержанием [In] ~ 50%.

Таблица 1. Параметры InGaN слоёв

Содержание [In], %	100	90	80	70	60	50
Ширина [0004], °	0.24	0.26	0.28	0.31	0.36	0.52
Подвижность, см <sup>2</sup> /Вс	1355	910	680	180	100	80

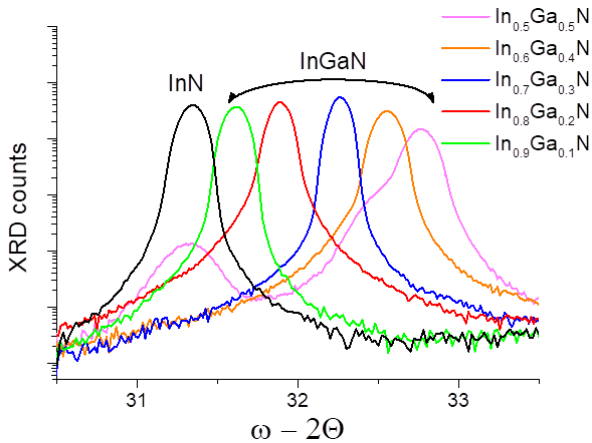


Рис. 1. Спектры рентгеновской дифракции образцов с слоями InGaN

Измерения электрофизических характеристик методом Холла показали, что для образцов, выращенных при  $T_g \sim 470^\circ\text{C}$ , подвижность электронов уменьшается более чем на порядок при переходе от бинарного InN к слою InGaN с содержанием [In] ~ 50 % (таб. 1). Частично это может быть связано с более низкой подвижностью носителей заряда в InGaN сплаве по сравнению с бинарным материалом InN. Кроме того, в снижение подвижности носителей заряда в InGaN могут вносить вклад как усиление флуктуации состава, так и ухудшение кристаллического качества InGaN слоёв с уменьшением содержания [In].

Фоновая концентрация электронов для всех исследуемых образцов отличалась слабо и составляла  $1-2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что может быть обусловлено как высокой плотностью дислокаций, так и неконтролируемым встраиванием примеси в процессе роста.

Положение максимума сигнала спонтанной ФЛ от слоев InGaN смещается в область больших энергий с уменьшением содержания [In], что связано с увеличением ширины запрещённой зоны (рис.2). При этом происходит снижение интенсивности и существенное уширение сигнала ФЛ. Последнее косвенно подтверждает предположение об усилении

флуктуаций состава с уменьшением содержания [In] в слоях InGaN.

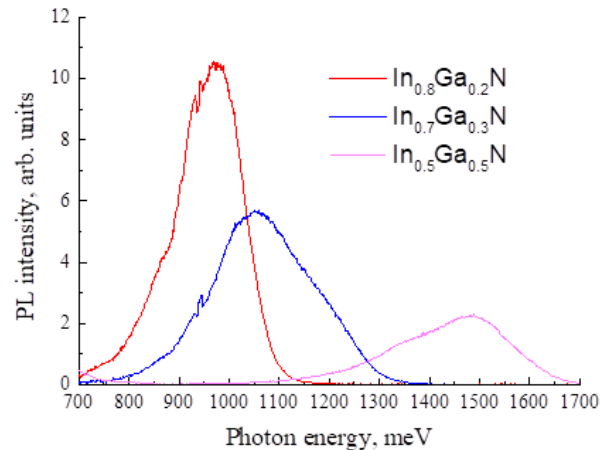


Рис. 2. Спектры спонтанной ФЛ слоев InGaN различного состава, выращенные при  $T_g \sim 470^\circ\text{C}$ , при оптической накачке непрерывным лазером на длине волны возбуждения  $\lambda_{\text{ex}} = 0.8 \text{ мкм}$  при 77 К

Понижение температуры роста слоя InGaN с содержанием [In] ~ 50% с  $T_g \sim 470^\circ\text{C}$  до  $T_g \sim 420^\circ\text{C}$  приводит к подавлению разложения материала в процессе роста, о чём свидетельствует отсутствие сигнала от металлического In в спектрах РДА слоя  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ , выращенного при низкой  $T_g$ . Однако, сигнал от InN, свидетельствующий о продолжающихся процессах спинодального распада, в РД спектрах  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  слоя исчезает лишь при понижении  $T_g$  до  $380^\circ\text{C}$ . Также, понижение  $T_g$  с  $470^\circ\text{C}$  до  $380^\circ\text{C}$  сопровождается уширением и падением более чем на порядок интенсивности сигнала ФЛ от  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  слоя, что говорит о деградации его кристаллического качества с понижением температуры роста. Показано, что добиться подавления разложения и отсутствия признаков спинодального распада в РД спектре при росте  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  слоя при  $T_g \sim 470^\circ\text{C}$  возможно при увеличении потока азота (III/V~0.5). При этом сохраняется планарность роста слоя, а его спектр ФЛ практически не меняется по сравнению со спектром  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  слоя, выращенного при более низком потоке азота (III/V~0.9).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

## Литература

1. G.B. Stringfellow. J. Cryst. Growth, 312, 735 (2010).



# Эффект Парселла и коллимация излучения в гибридных нанопроводах AlGaAs с квантовыми точками GaAs

М.А. Калитеевский<sup>1,2,\*</sup>, Р.Р. Резник<sup>1,3</sup>, Г.Е. Цырлин<sup>1</sup>, К.П. Котляр<sup>1</sup>, И.В. Илькив<sup>3</sup>, Н. Акопян<sup>4</sup>, Л. Леонардо<sup>4</sup>, В.В. Николаев<sup>5</sup>, А.В. Белоновский<sup>1,2</sup>

1 Санкт-Петербургский Академический Университет, улица Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021.

2 Санкт-Петербургский Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101.

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

4 Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, 2800 Kongens Lyngby, Denmark;

5 Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021.

\*m.kaliteevski@mail.ru

Одним из самых важных свойств нанопроводов является возможность управлять скоростью и направлением спонтанного излучения, обеспечивая как подавление, так и усиление спонтанного излучения. В данной работе сообщается о существенной коллимации излучения с длиной волны около 800 нм из AlGaAs нанопровода с квантовыми точками GaAs, который не поддерживает эффективное излучение в волноводные моды, включая основную фундаментальную моду. Экспериментальные измерения показывают, что интенсивность излучения для направлений вблизи оси нанопровода примерно на два порядка выше, чем для перпендикулярных направлений. Разработанный теоретический подход позволил рассчитать вероятность спонтанного излучения как для различных направлений, так и в волноводные моды и показал, что узконаправленное излучение может быть обеспечено собственными эмиссионными свойствами цилиндрических нанопроводов.

## Введение

Нанопровода с квантовыми точками интенсивно изучаются в связи с их потенциальным применением, особенно в качестве источника квантового света. Источники одиночных фотонов, созданные на основе нанопроводов со встроенными квантовыми точками (КТ), являются необходимыми компонентами масштабируемых оптических квантовых устройств обработки квантовой информации.

Общий подход основан на излучении квантовых точек в основную волноводную моду  $HE_{11}$  и последующем излучении во вне за счет сужения конца нанопровода. Диаметр нанопровода должен быть оптимизирован для эффективного излучения КТ в основную моду  $HE_{11}$ , а конец нанопровода должен коллимировать и направлять излучение. В силу технологических особенностей не всегда удается вырастить нанопроволоки с диаметром, подходящим для эффективного удержания основной волноводной моды  $HE_{11}$  (в случае ННК из AlGaAs с КТ GaAs диаметр нанопровода должен быть больше 180 нм). В тоже время некоторые экспериментальные и теоретические результаты показывают, что взаимодействие света с экситонами, структурные особенности и деформации могут приводить к появлению ярко выраженной аксиальной компоненты электрического диполя [1]. Поэтому, является акту-

альным проведение исследований спонтанного излучения в нанопроводах без участия волноводных процессов.

## Результаты и обсуждения

Нанопроволоки из AlGaAs с КТ GaAs были выращены с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии (рисунок 1) [2]. Диаметр нанопроволоки в основании составляет 130 нм. Высота нанопроволоки около 2 мкм. Внутри на оси расположено 10 КТ GaAs диаметром приблизительно 30 нм и высотой 10.5 нм.

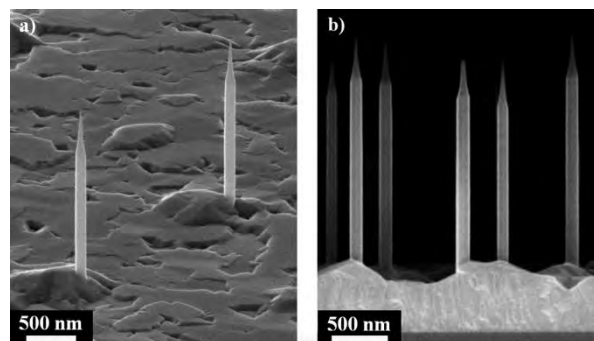
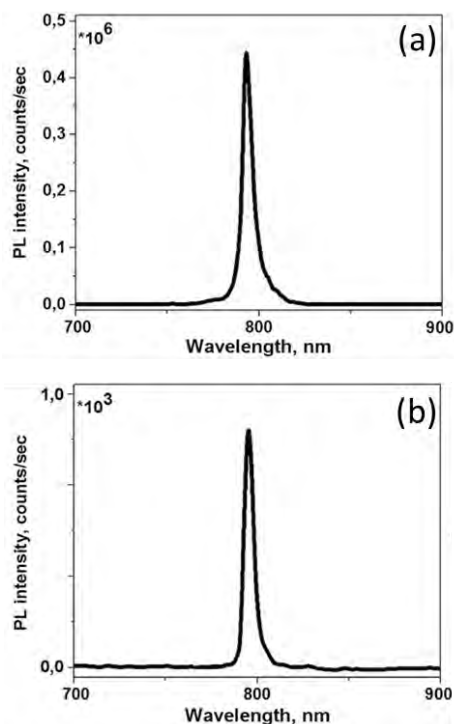


Рис. 1. SEM-изображение нанопроводов на подложке

Для данных структур измерялись спектры микрофотолюминесценции ( $\mu$ PL). Для сравнения интенсивности излучения КТ в разных направлениях часть ННК снималась с поверхности подложки и



помещалась на поверхность чистой кремниевой пластины. На рисунке 2 представлены типичные спектры  $\mu$ PL, соответствующие излучению квантовых точек GaAs в одиночных нанопроводах AlGaAs, выращенных в направлении, перпендикулярном поверхности подложки Si (рисунок 2a), а также помещенных на поверхность Si одиночных нанопроводов (рисунок 2b). В обоих случаях сигнал  $\mu$ PL от КТ собирался в направлении, перпендикулярном поверхности подложки. Как видно из рисунка, интенсивность  $\mu$ PL лежащей на поверхности наноструктуры приблизительно на 2 порядка меньше, чем у неотделяемой от поверхности подложки наноструктуры.

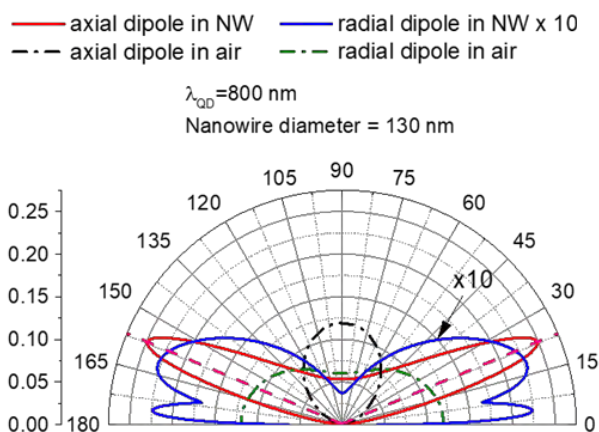


**Рисунок 2.** Спектры  $\mu$ PL нанопровода с КТ, вертикально стоящего на подложке (a), и лежащего на подложке (b)

Для теоретического рассмотрения данного вопроса был разработан метод S-квантования для структур с цилиндрической симметрией. S-квантование используется для квантования поля в среде с неоднородностью и осуществляется путем приравнивания амплитуд волн, падающих на структуру и убегающих от нее, или, иначе говоря, путем приравнива-

ния единице собственных значений матрицы рассеяния [3].

В результате теоретических расчетов фактора Парселла было показано, что для нанопровода AlGaAs диаметром 130 нм интенсивность излучения для аксиального диполя выше чем для радиального почти на порядок. Излучение происходит преимущественно в утекающие (не волноводные) моды.



**Рис. 3.** Красными (синими) кривыми представлены угловые распределения излучения для аксиального (радиального) диполя на оси симметрии структуры. Черная (зеленая) кривая дает распределение излучения аксиального (радиального) диполя в вакууме. Показаны коэффициенты масштабирования, которые были применены к угловому распределению излучения радиального диполя для удобства сравнения

Также расчеты диаграмм направленности показали, что узконаправленное излучение от нанопровода может быть получено без участия волноводных процессов (рисунок 3).

## Литература

1. M. Jeannin et al. // Phys. Rev. Appl., V. 8, pp. 054022 (2017).
2. R. R. Reznik et al. // Nanomaterials vol. 11, no. 11, pp. 2894 (2021).
3. М. А. Калитеевский и др. // Оптика и спектроскопия. Т. 119, № 5. С. 810 (2015).

# Особенности роста наноструктур InP на Si(111) в квазиравновесных условиях

Л.Б. Карлина<sup>1</sup>, А.С. Власов<sup>1</sup>, И.В. Илькив<sup>2</sup>, А.В. Вершинин<sup>2</sup>, К.П. Котляр<sup>2</sup>,  
А.С. Драгунова<sup>2</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>2</sup>, И.П. Сошников<sup>1-3</sup>

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

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

<sup>3</sup> ИАП РАН, Санкт-Петербург, Россия.

В работе представлены исследования особенностей Au каталитического роста нитевидных наноструктур InP в квазизамкнутом объеме. Продемонстрирована возможность получения латеральных и свободных InP ННК с характерными размерами до нескольких десятков микрон в длину и 50-200 нм в диаметре.

Проблемы производства оптоэлектронных устройств, интегрированных с кремниевой технологией, представляют особый интерес. Одно из направлений в этой области связано с выращиванием нитевидных наноструктур III-V фосфидов на кремниевой подложке [1-5]. В частности, технологии выращивания таких структур, основанные на каталитическом росте методом пар-жидкость-кристалл (ПЖК) [2,3], которые включают предварительное нанесение наноразмерных капель катализатора на поверхность кремния

В работе представлены экспериментальные исследования каталитического роста InP наноструктур по механизму пар – жидкость – кристалл из источника паров InP в квазизамкнутом объеме [6] на активированной золотом поверхности кремния (111). Особое внимание уделено существенному изменению и упрощению начальной стадии подготовки синтеза наноструктур.

Синтез наноструктур осуществлялся в кварцевом реакторе в графитовой кассете в потоке водорода с точкой росы не хуже  $-76^{\circ}\text{C}$ . в модернизированной диффузионной печи типа СДО. Конструкция реактора, описанная ранее, [6] содержит специальные графитовые ячейки-испарители с раствором-расплавом InP в индии.

В качестве каталитических центров роста ННК на поверхность подложек Si (111) наносились коллоидные капли золота диаметром  $60 \pm 5$  нм из раствора [7]. Синтез наноструктур реализован в квазизамкнутом объеме с источником - испарителем на установке. Для работы в источник-испаритель загружался монокристаллический полуизолирующий фосфид индия. Рост наноструктур осуществлялся

при температуре  $500 \pm 10^{\circ}\text{C}$  в течение  $60 \pm 10$  минут [6].

В ходе исследования поверхностной морфологии методами растровой электронной микроскопии и микроанализа обнаружено присутствие нитевидных нанокристаллов InP (ННК) различной длины (до десятков микрон) и диаметра (50-200 нм) (Рис.1а). Отмечается образование латеральных и свободных ННК, ориентированных вдоль направлений типа  $\langle 111 \rangle$ . Анализ размеров ННК (длины и диаметра) свидетельствует о преимущественно классическом ПЖК механизме роста [8-10]. Исследования электронной дифракции от полученных образцов указывает на присутствие гексагональной (вюрцитной) фазы в InP ННК.

Спектры Рамановского рассеяния от образцов с синтезированными наноструктурами демонстрируют присутствие колебаний в диапазоне  $296-303 \text{ см}^{-1}$ , соответствующих модам поперечных колебаний InP. Положение и интенсивность колебаний оказывается неоднородным по поверхности образца и соответствует различной плотности и размерам наноструктур InP.

Изучение спектров фотолюминесценции показывает наличие полосы излучения в области 800-1000 нм, что соответствует ширине запрещенной зоны InP (рис.1б). Кроме того, отмечено появление пиков в области 1100 и 1200 нм. Полученные спектры свидетельствуют о кристаллическом качестве полученных структур.

Таким образом, проведен сравнительный анализ особенностей роста InP наноструктур на поверхности кремния. Показана перспективность предложенного нами метода роста InP наноструктур на поверхности кремния.

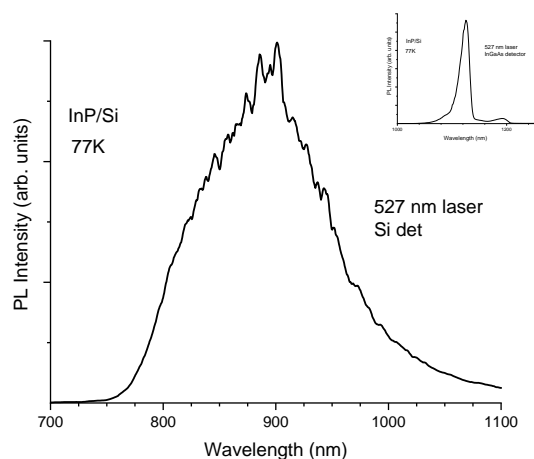


Рис.1 а) РЭМ изображение поверхности образца с InP ННК, выращенными в квазизамкнутом объеме на поверхности Si(111) с коллоидными частицами Au 60 нм. б) Спектр фотолуминесценции при 77 К от образца, приведенного на рис. а

## Литература

1. A Mavel, N Chauvin, Ph Regreny, G Patriarche, B Masenelli, M Gendry, J Crystal Growth 458 (2017) 96.
2. A Jaffa, P Regreny, G Patriarche, N Chauvin and M Gendry, Nanotechnology **31** (2020) 354003.
3. S Breuer, M Hilse, L Geelhaar, H. Riechert, J Crystal Growth 323 (2011) 311.
4. LC Chuang, M Moewe, Sh Crankshaw, and C Chang-Hasnain, Appl. Phys. Lett. **92** (2008), 013121.
5. HA Fonseka, HH Tan, J Wong-Leung, JH Kang, P Parkinson and C Jagadish, Nanotechnology 24 (2013) 465602.
6. LB Karlina, AS Vlasov, IP Soshnikov, IP Smirnova, BY Ber, AB Smirnov, Semiconductors 52 (2018) 1363.
7. АД Буравлев, ИП Сошников, ГЭ Цырлин, И Илькив, Патент RU2016149164 (A) Method for deposition of colloidal nanoparticles of gold on surface of silicon semiconductor plates.
8. В.Г. Дубровский Теория формирования эпитаксиальных наноструктур Физматлит 2009 ISBN:978-5-9221-1069-3.
9. A Rothman, VG Dubrovskii, E Joselevich. Proceedings of the National Academy of Sciences 2019, 117 (1), 152-160.
10. Е.И. Гиваргизов. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара (М., Наука, 1974).

# Температурные особенности свойств транзисторной МДП структуры на основе пленки топологического кристаллического изолятора PbSnTe:In

А.Э. Климов<sup>1,2,\*</sup>, И.О. Ахундов<sup>1</sup>, В.А. Голяшов<sup>1,3</sup>, Д.В. Горшков<sup>1</sup>, Д.В. Ищенко<sup>1</sup>, Н.С. Пашин<sup>1</sup>, Г.Ю. Сидоров<sup>1</sup>, С.П. Супрун<sup>1</sup>, А.С. Тарасов<sup>1</sup>, Е.В. Федосенко<sup>1</sup>, О.Е. Терещенко<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Технический Университет, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073.

<sup>3</sup> Новосибирский Государственный Университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090.

\*klimov@isp.nsc.ru

В диапазоне  $T = (4,2 - 22)$  К исследованы затворные характеристики МДП – структуры на основе пленок PbSnTe:In, полученных методом МЛЭ, и показано, что их особенности могут быть связаны с сегнетоэлектрическим фазовым переходом вблизи  $T \sim (20 - 22)$  К.

## Введение

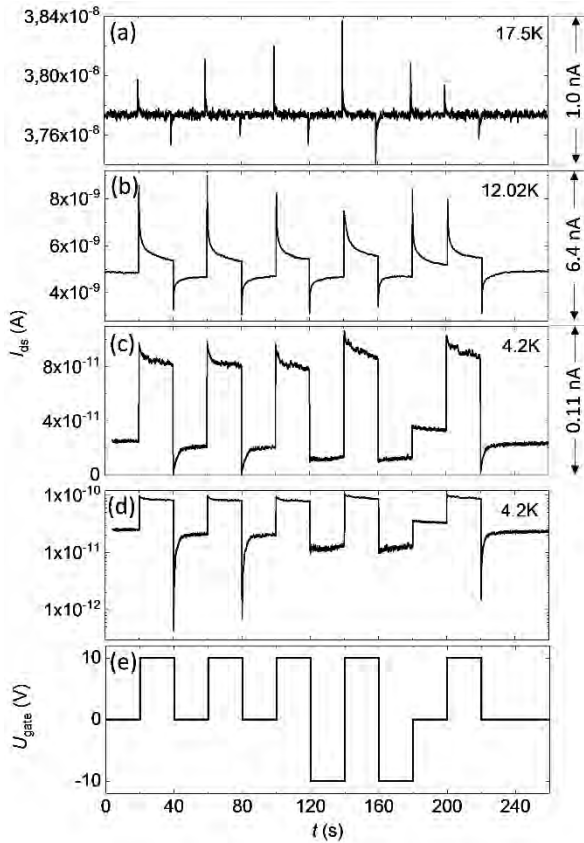
Узкозонный полупроводник  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  обладает рядом интересных свойств, связанных с составом  $x$  и легированием: «безщелевое» состояние при  $x_0 \sim 0,35$ ; сегнетоэлектрический фазовый переход (СЭФП) с зависящей от состава температурой Кюри  $T_C(x)$  и  $T_C \sim 20$  К при  $x \sim (0,25 - 0,3)$ ; гигантская статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon(x)$ , вплоть до  $\epsilon > 10^4$  при  $T = 4,2$  К и  $\epsilon > 10^5$  вблизи  $T_C$ ; «изолирующее» состояние при гелиевых температурах при добавлении In с концентрацией несколько ат. % в определенном диапазоне  $x$  [1]. В последнее десятилетие особый интерес вызывают связанные с поверхностью топологические свойства PbSnTe, наблюдаемые при  $x > x_0$  или даже при  $x \sim x_0$ . Эффективным инструментом исследования поверхностных транспортных свойств является эффект поля, используемый, в частности, в МДП транзисторах (МДПТ). Однако большая проводимость, связанная с высокой концентрацией собственных точечных электрически активных дефектов, в комбинации с большой  $\epsilon$  существенно затрудняет создание и исследование МДПТ на основе нелегированного PbSnTe.

Нами были впервые созданы МДПТ на основе пленок PbSnTe:In/BaF<sub>2</sub> с низкой проводимостью толщиной  $\sim 2$  мкм, полученных методом МЛЭ [2]. Ширина канала МДПТ  $\sim 10$  мкм при длине  $L_{ds} = (6 - 18)$  мкм, толщина подзатворного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\sim 72$  нм. При  $T = 4,2$  К изменение тока канала  $I_{ds}$  затворным напряжением  $-10 \text{ В} < U_{gate} < +10 \text{ В}$  до-

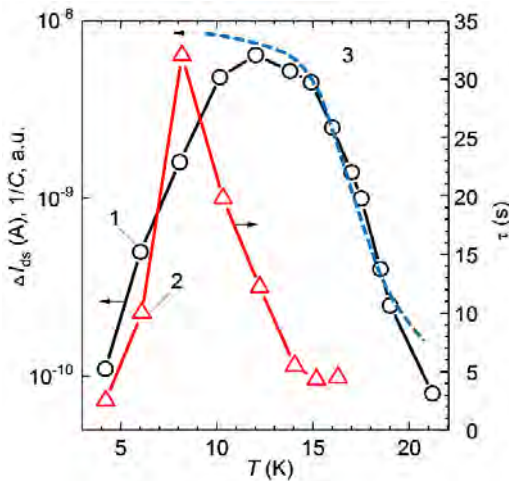
стигало  $\sim 1000$  раз. Исследованы зависимости  $I_{ds} = f(U_{ds})$  и  $I_{ds} = f(U_{gate})$  в стационарном режиме, при линейной развертке и при ступенчатом переключении  $U_{gate}$ . В работе приводятся результаты для МДПТ с  $L_{ds} = 6$  мкм.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости  $I_{ds}(t)$  для трех значений  $T$  (a-d) при ступенчатом переключении  $U_{gate}$  (e). Справа от (a-c) приведены характерные величины изменения  $\Delta I_{ds}$ . С изменением  $T$  меняется и  $\Delta I_{ds}$ , и характер релаксации  $I_{ds}$ . После переключения  $U_{gate}$  наблюдается «быстрое» изменение  $I_{ds}$  за время  $\sim 1$  с, а затем «медленный» участок, аппроксимируемый экспонентой вида  $\Delta I_{ds} \cdot \exp(-t/\tau)$ . Зависимости  $\Delta I_{ds}(T)$  — кривая (1), и  $\tau(T)$  — кривая (2), полученные из измерений  $I_{ds}(t)$  при 13-ти фиксированных  $T$ , показаны на рис. 2. Величина  $\tau$  определялась на участке  $t = (60 - 80)$  с. В интервале  $T \sim (12 - 21)$  К величина  $\Delta I_{ds}(T)$  падает почти в 100 раз, а при  $T > 22$  К становится не измеряемой на фоне шума. Кривая (3) соответствует зависимости  $1/C(T)$  в произвольных единицах. Здесь  $C(T)$  — взятая из [3] экспериментальная температурная зависимость низкочастотной емкости конденсатора на основе PbSnTe:In, т.е.  $C(T) \sim \epsilon(T)$ . В области  $T \sim (13 - 19)$  К форма  $1/C(T)$  хорошо совпадает с формой  $\Delta I_{ds}(T)$ . Зависимость  $\tau(T)$  выражено немонотонная с максимумом вблизи  $T \sim 12$  К. В интервале  $T \sim (4,2-17)$  К значение  $\tau(T)$  меняется более чем в 10 раз.



**Рис. 1.** Временные зависимости тока сток/исток  $I_{ds}$  МДПТ при разных  $T$  (a-d) и затворного напряжения  $U_{gate}$  (e). Температура указана на рисунках, (d) – полулогарифмический масштаб



**Рис. 2.** Температурные зависимости изменения тока канала  $\Delta I_{ds}$  под действием  $U_{gate}$  (1), «длинного» времени релаксации  $I_{ds}$  (2) и обратной величины емкости  $1/C$  в произвольных единицах (3), взятой из работы [3]

Экспериментальные данные находят объяснение в рамках следующей качественной модели. Релаксационные особенности на рис. 1 определяются сравнительно медленными ловушками вблизи или на интерфейсе PbSnTe:In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом в первый момент после переключения  $U_{gate}$  (до перезарядки

ловушек) «скачок»  $I_{ds}(t)$  связан с экранировкой поля затвора  $E_{gate}$  только подвижными носителями заряда с плотностью, пропорциональной  $(\epsilon_{Al_2O_3}/\epsilon_{PbSnTe}) \cdot E_{gate}$ . Здесь  $\epsilon_{Al_2O_3}$  и  $\epsilon_{PbSnTe}$  – диэлектрическая проницаемость Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и PbSnTe. Быстрое нарастание  $\epsilon_{PbSnTe}$  с увеличением  $T$  из-за СЭФП вблизи  $T \sim 22$  K и ведет к снижению эффекта поля в МДПТ с ростом  $T$ . Наличие СЭФП может оказывать влияние и на  $\tau(T)$ , которое наблюдалось, например, в [4]. Такое влияние, по-видимому, носит сложный характер. Тем не менее, сам факт сильной и нетривиальной зависимости  $\tau(T)$  в узком интервале  $T$  позволяет считать, что «медленные» ловушки вблизи интерфейса PbSnTe:In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> расположены со стороны PbSnTe:In. Захват на них электронов при  $U_{gate} > 0$  и их выброс при  $U_{gate} < 0$  с образованием аналога отрицательно или положительно заряженного «плавающего затвора» объясняет ряд особенностей на рис. 1. Поведение  $\Delta I_{ds}(T)$  при  $T < 12$  K может быть объяснено, в принципе, уменьшением подвижности носителей заряда, которое обычно наблюдается на пленках, на основе которых изготовлен МДПТ.

### Заключение

Температурные особенности МДПТ на основе пленок PbSnTe:In находят качественное объяснение в рамках модели, учитывающей СЭФП с температурой Кюри  $T_C \sim 22$  K, а также наличие ловушек разного типа, расположенных вблизи интерфейса PbSnTe:In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со стороны PbSnTe:In. Изменение параметров этих ловушек с температурой может быть также обусловлено СЭФП.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 20-02-00324.

### Литература

1. Lead Chalcogenides: Physics & Applications, ed. by D. Khokhlov, New York, Taylor & Francis, 650 p. (2003).
2. А.Э. Климов, В.А. Голяшов, Д.В. Горшков *и др.* // ФТП, Т. 56, 243 (2022).
3. А.Е. Klimov, V.N. Shumsky, V.V. Kubarev. // Ferroelectrics, V.347. P.111-119 (2007).
4. A.N. Akimov, A.E. Klimov, I.G. Neizvestny *et al.* // Semiconductors, V. 50, 440 (2016).

# Акустические свойства слоев и интерфейсов в Ван-дер-Ваальсовых гетероструктурах $hBN/WSe_2/hBN/Al_2O_3$ в диапазоне частот до 150 ГГц

А.Ю. Клоков<sup>1,\*</sup>, Н.Ю. Фролов<sup>2</sup>, А.И. Шарков<sup>1</sup>, С.Н. Николаев<sup>1</sup>, С.И. Ченцов<sup>1</sup>,  
М.А. Чернопицкий<sup>1</sup>, М.В. Пугачев<sup>1</sup>, А.И. Дулебо<sup>1</sup>, А.В. Шуплецов<sup>1</sup>, В.С. Кривобок<sup>1</sup>,  
А.Ю. Кунцевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект, 53, Москва, 119991, Россия.

<sup>2</sup> Национальный Исследовательский Ядерный Университет Московский Инженерно-Физический Институт, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия.

\*klokov@lebedev.ru

В гетероструктуре на основе нанометровых Ван-дер-Ваальсовых слоёв  $hBN/WSe_2/hBN/Al_2O_3$  методом накачка-зондирования исследовано возбуждение и распространение когерентных фононов. Выявлены области, содержащие монослои  $WSe_2$ , инкапсулированные в слои гексагонального нитрида бора с толщинами  $\sim 10$  нм. Получены оценки констант силового взаимодействия слоёв, обнаружено, что в диапазоне частот до 150 ГГц в гетероструктуре практически отсутствует неупругое рассеяние фононов.

## Введение

Двумерные Ван-дер-Ваальсовы слои и гетероструктуры на их основе вызывают значительный интерес благодаря их электронным, оптическим и упругим свойствам, позволяющим на их основе создавать широкий класс новых устройств. При создании таких устройств необходимо собирать гетероструктуры состоящие из большого количества слоёв с толщинами вплоть до атомарных. Работоспособность таких структур зависит от латеральной однородности слоев и межслоевых интерфейсов, которые могут существенно повлиять на транспорт зарядов и фононов. В тоже время толщины слоёв и качество интерфейса влияют на акустические свойства гетероструктур – например резонансные колебания, для исследования которых идеально подходит пикосекундная акустика [1].

Данная работа посвящена исследованию акустических параметров нанометровых слоев и интерфейсов в Ван-дер-Ваальсовых гетероструктурах изготовленных методом слоения на основе гексагонального нитрида бора ( $h-BN$ ) и диселенида вольфрама ( $WSe_2$ ), методом пикосекундной акустики.

## Образец и эксперимент

Слои  $WSe_2$  различной толщины (от монослоя до 20 нм), были инкапсулированы в гексагональный нитрид бора ( $h-BN$ ), толщиной  $\sim 10$  нм, и помещены на сапфировую подложку. План образца с моносло-

ем  $WSe_2$  и расположение слоёв показано на Рисунке 1а. Структуры с монослоями  $WSe_2$  демонстрировали интенсивную экситонную фотолюминесценцию (Рис.1б). Сверху напылялась алюминиевая плёнка толщиной 30 нм, которая служила генератором гиперзвука.

Экспериментальное исследование акустических свойств Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур проводилось с помощью оптической методики возбуждение-зондирование (Pump-Probe). Генерация и детектирование упругих импульсов осуществлялись с помощью  $Ti:Sa$  лазера, генерирующего последовательность фемтосекундных импульсов длительностью 160 фс, периодом повторения 13 нс. Изменение коэффициента отражения, вызванное распространяющимся упругим импульсом регистрировалось с помощью интерферометра Саньяка [2]. Отклик имел вид импульса с фронтом несколько пикосекунд, за которым следовал медленный спад, на котором в течение порядка 100 пс присутствовали осцилляции, вызванные распространяющимся упругим импульсом. Для выявления осциллирующих особенностей отклика медленная составляющая аппроксимировалась либо суммой экспонент, либо полиномами и вычиталась.

Далее производилось преобразование Фурье осциллирующей части. Установка позволяла производить картографирование откликов структуры с разрешением  $\sim 1$  мкм.

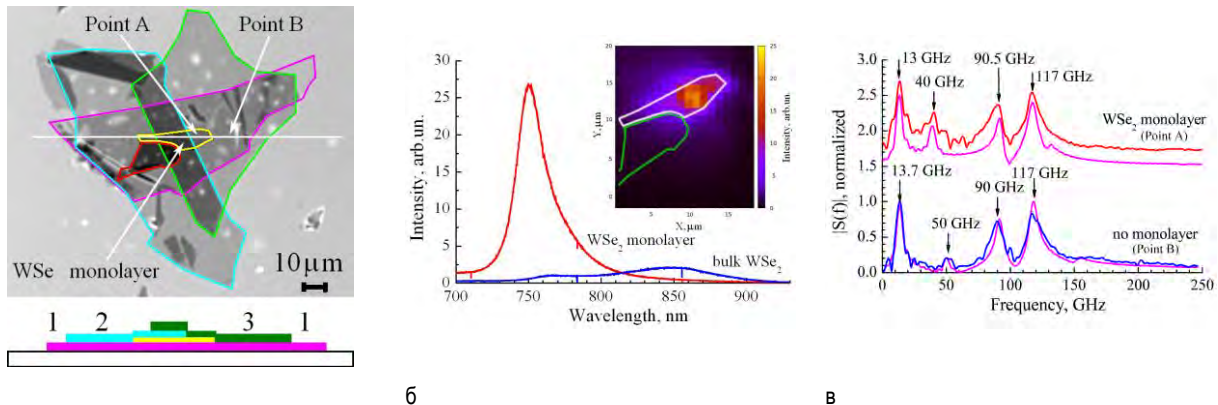


## Результаты и обсуждение

Типичный спектр (Рис. 1в) состоял из трёх линий: низкочастотной  $\sim 19$  ГГц, высокочастотной  $\sim 114$  ГГц и среднечастотной в диапазоне от 25 до 80 ГГц. В отдельных областях структуры высокочастотная линия приобретала дублетную структуру с максимумами на частотах  $\sim 90$  ГГц и 120 ГГц. На образцах с монослоями  $WSe_2$  среднечастотная линия на области, содержащей  $WSe_2$ , была смещена на  $\sim 10$  ГГц по сравнению линией на области, где отсутствовал  $WSe_2$ . Картографирование спектров откликов выявило области с различным составом, и, таким образом, может быть использовано для акустической томографии наноструктур. Чувствительность метода оказалась достаточной, чтобы выявить монослой  $WSe_2$ , инкапсулированный в слой гексагонального нитрида бора с толщинами  $\sim 10$  нм. Для идентификации линий и определения акустических параметров слоёв и интерфейсов проводилось математическое моделирование оптического возбуждения когерентных фононов (гиперзвука) а также оптического отклика (изменение комплексного коэффициента отражения), вызванного распространением когерентных фононов. Для описания межслоевых интерфейсов использовалась либо модель акустического рассогласования (AP), либо предполагалось, что слои связаны невесомыми пружинками (Ван-дер-Ваальсовыми связями).

Монослой моделировался сосредоточенной массой на границе слоёв, что давало разрыв тензора упругого напряжения. Моделирование показало, что низкочастотная линия соответствует движению структуры как целого относительно подложки. Высокочастотная линия 114 ГГц соответствует собственным колебаниям алюминиевой плёнки-генератора. Частота среднечастотной линии приблизительно определяется обратным удвоенным временем распространения фононов через всю структуру. Дублетная высокочастотная линия появлялась, при определённых суммарных «акустических толщинах» структуры, когда фононы, распространяющиеся по всей структуре, находились в противофазе с фононами, распространяющимися в алюминиевой плёнке. В результате математического моделирования откликов удалось получить оценки силовых констант взаимодействия  $hBN/сапфир$  ( $\sim 5 \cdot 10^{18}$  Н/м<sup>3</sup>),  $hBN/hBN$  (AP),  $hBN/WSe_2$  ( $> 10^{19}$  Н/м<sup>3</sup>), кроме того, оказалось, что в слоях (за исключением алюминиевой плёнки) практически отсутствует неупругое рассеяние фононов с частотами менее 150 ГГц, что делает Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры перспективными для наноакустики.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-598 в ФИАН.



**Рис. 1.** а – микрофотография образца слоистой ВДВ структуры и её схематический разрез по белой линии. Жёлтым цветом обозначен монослой  $WSe_2$ , пурпурным – нижний слой h-BN (толщина 10 нм), голубым и зелёным – верхний слой h-BN (толщина 10 нм); б – фотолюминесценция структуры с монослоем  $WSe_2$ : пространственная картина и спектр; в – спектр отклика структуры на фемтосекундное возбуждение

## Литература

1. J. D. G. Greener, A. V. Akimov, V. E. Gusev *et al.* // Phys. Rev. B 98, 075408 (2018).
2. T. Tachizaki, T. Muroya, O. Matsuda *et al.* // Rev. Sci. Instrum. 77, 043713 (2006).

# Пленки n-InAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из сапфира

А.Н. Клочков<sup>1,\*</sup>, А.Н. Виниченко<sup>1</sup>, Д.А. Сафонов<sup>1</sup>, М.О. Смирнова<sup>1</sup>, А.А. Тимофеев<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Россия

\*klochkov\_alexey@mail.ru

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены пленки n-InAs на подложках  $\alpha$ -сапфира с-ориентации. Обнаружено, что использование зародышевого слоя InAlAs на начальном этапе роста приводит к снижению шероховатости пленок n-InAs и снижению ширины рентгеновских кривых качания.

## Введение

Во многих приложениях для работы в условиях ионизирующего излучения требуются проводящие полупроводниковые пленки, размещенные на устойчивой к излучению непроводящей подложке. Например, холловские датчики магнитного поля востребованы для исследовательских проектов Mega science. Пленки на основе InAs на подложках из сапфира  $Al_2O_3$  является подходящими для решения данной задачи, поскольку сапфир является одним из самых стойких к ионизирующему излучению диэлектриков, а InAs n-типа характеризуется закреплением уровня Ферми в зоне проводимости.

Однако, эпитаксиальный рост пленок InAs на подложке  $Al_2O_3$  является неизученной задачей. Сложность обусловлена различными периодом кристаллической решетки и кристаллическими структурами. InAs обладает кубической решеткой типа цинковой обманки, а сапфир  $\alpha$ - $Al_2O_3$  – гексагональной решеткой. В литературе найдена только одна статья по тематике получения слоев InAs на сапфире [1], где выращены поликристаллические пленки InAs при различных температурах роста от 320 до 380 °С.

## Пленки n-InAs на сапфире

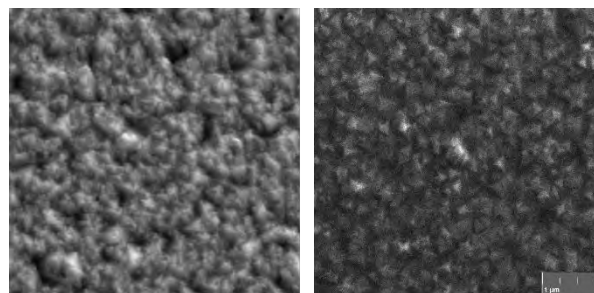
Пленки n-InAs были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в установке Riber Comraft 21-T. Номинальная толщина пленок составляла 100 нм. Температура роста слоев InAs составляла 430-460 °С. Использовались epi-ready подложки сапфира  $\alpha$ - $Al_2O_3$  с-ориентации поверхности с напыленным слоем титана толщиной 1 мкм на

обратной стороне для увеличения эффективности радиационного нагрева подложек.

**Таблица 1.** Параметры пленок n-InAs

Обр.	$N_{Si}$ , $10^{19} \text{ см}^{-3}$	$n$ , $10^{19} \text{ см}^{-3}$	$\mu$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$R_q$ , нм
1	7.5	3.74	210	16.0
2	7.5	1.68	625	9.5
3	3.5	2.09	560	7.5

Образцы различались конструкцией зародышевых слоев на границе между подложкой  $Al_2O_3$  и слоем n-InAs, а также концентрацией легирования кремнием пленки n-InAs. В образце #1 использовался зародышевый слой InAs (2 нм), в образцах #2 и #3 – зародышевый слой InAlAs (2 нм) + InAs (2 нм). В таблице 1 приведены параметры пленок n-InAs: объемная концентрация легирующих атомов  $N_{Si}$ , холловская концентрация  $n$  и подвижность  $\mu$ , среднеквадратичная шероховатость поверхности  $R_q$ , определенная методом атомно-силовой микроскопии.



**Рис. 1.** Изображение поверхности пленок n-InAs: а – №1, б – №2

На рисунке 1 приведены снимки поверхности образцов #1 и #2 в сканирующем электронном микроскопе. Образцы обладают шероховатой холмистой поверхностью. Однако характер поверхности об-

разца #2 отличается тем, что состоит из зерен треугольной формы с кристаллографически-ориентированными гранями. Наличие двух типов треугольных наноструктур, повернутых друг относительно друга на 60 градусов указывает на наличие дефектов двойникования для образца #2. Шероховатость поверхности пленок n-InAs #2 и #3, выращенных с зародышевым слоем InAlAs, существенно меньше по сравнению с образцом #1.

## Рентгеновская дифракция

Съемка рентгеновских кривых дифракционного отражения (КДО) выполнялась на дифрактометре Rigaku "Ultima IV" в двухкristальной геометрии с излучением меди Cu  $K_{\alpha 1}$ . На рисунке 2 приведены измеренные КДО в режиме  $2\theta$ - $\omega$ . Форма кривых для трех образцов одинаковая. Кроме интенсивных линий при  $2\theta = 41.68^\circ$  и  $90.74^\circ$ , соответствующих отражению от плоскостей (006) и (0012) с-оси монокристаллической подложки сапфира, на КДО присутствуют линии отражения кубического InAs с индексами плоскостей (111), (222), (333) и (444). Таким образом, для трех образцов пленок n-InAs, выращенных на подложках  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кристаллографическая ориентация равна (111).

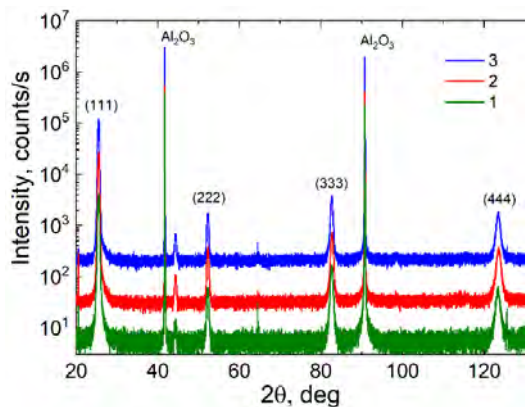


Рис. 2. Кривые дифракционного отражения пленок n-InAs в режиме  $2\theta$ - $\omega$

На рисунке 3 приведены кривые качания линии отражения InAs (111) ( $2\theta = 25.44^\circ$ ). В  $\omega$ -скане полуширина пика отражения характеризует кристаллическое совершенство пленки. Чем выше полуши-

рина, тем из большего числа зерен состоит поликристалл и тем сильнее различается ориентация этих зерен. Ширина кривой качания на половине высоты для образца InAs #1 составляет  $2.02^\circ$ . Для образцов #2 и #3 полуширина кривой качания составляет  $1.12^\circ$  и  $1.14^\circ$ , соответственно. Таким образом, использование затравочного буферного слоя InAlAs позволяет существенно повысить структурное совершенство выращиваемого выше слоя InAs. Кривые качания для образцов #2 и #3 имеют качественное отличие формы: наличие острого пика в центре кривой качания. Это указывает на то, что в отличие от образца #1, который состоит из различно ориентированных зерен InAs, образцы #2 и #3 содержат две фазы. Одна фаза соответствует монокристаллическому эпитаксиальному слою, дающему острый пик на кривой качания, а вторая фаза – различно ориентированным зернам InAs, дающим широкий гауссиан.

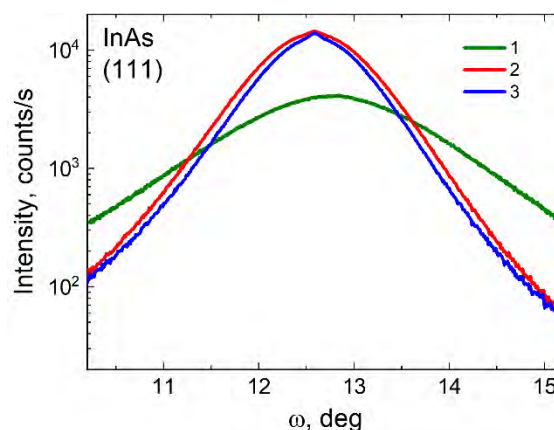


Рис. 3. Кривые качания для отражения InAs (111)

Работа выполнена в рамках Программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 гг. (Соглашение №075-15-2021-1352).

## Литература

A. Agrawal, Y. Tchoe // *Thin Solid Films*, V. 709, 138204 (2020).

# Фотолюминесценция доноров мышьяка в Ge

К.А. Ковалевский\*, Р.Х. Жукавин\*, В.Н. Шастин

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*atan4@yandex.ru

В работе исследована возможность формирования инверсной населенности состояний доноров мышьяка в кристалле германия при их оптическом возбуждении излучением ТЕА СО<sub>2</sub> лазера (9,2-11,2 мкм). Обнаружен сигнал ТГц спонтанного излучения оптически возбуждаемых указанных центров в условиях низких температур  $T \approx 4\text{K}$ . Исследованы кристаллы с различной концентрацией примесных центров  $N_d \sim (1,5-9) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Получена оценка темпа захвата на примесь  $\sim 10^9 \text{ с}^{-1}$ . Проведены измерения интенсивности ТГц излучения доноров мышьяка в одноосно деформированных кристаллах германия. Показано, что для слабых давлений ( $< 200 \text{ бар}$ ) зависимость сигнала от интенсивности накачки имеет явно выраженный суперлинейный характер.

## Введение

Создание компактных источников излучения в терагерцовом диапазоне частот является актуальной задачей на протяжении многих лет. Реализация лазерного эффекта в полупроводниках, в частности в кремнии, где рабочими переходами являются внутрицентровые переходы мелких примесных центров, показала перспективность данного направления исследований. Проведенные ранее теоретические и экспериментальные оценки [1,2] говорят о возможности создания подобных источников на основе объемного германия, легированного мелкими донорами.

## Эксперимент

В исследовании участвовали образцы с концентрацией доноров As и Sb в диапазоне  $N_d \sim (1,5-9) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Образцы имели форму параллелепипеда с характерными размерами  $5 \times 7 \times 3 \text{ мм}^3$  и были сориентированы так, чтобы прикладывать давление  $S$  вдоль кристаллографических направлений [111] и [110]. Измерения проводились при температурах жидкого гелия в условиях накачки излучением ТЕА СО<sub>2</sub> лазера с длиной волны 9,2 – 11,2 мкм, мощностью в импульсе до 1 МВт и длительностью импульса  $\sim 100 \text{ нс}$ . Образцы помещались в криогенную вставку с двумя детекторами на основе фотопроводимости: *n*-GaAs (красная граница соответствует  $\sim 5 \text{ мэВ}$ ) и Ge:Ga (красная граница соответствует  $\sim 10 \text{ мэВ}$ ). Для отсечки излучения накачки использовался сапфировый фильтр (пропускание для  $\lambda$  более 30 микрон) толщиной 1 мм, установленный под углом 90 градусов по направлению к распространению пучка возбуждения. Излучение накачки засвечивало всю поверхность кристалла. Сигнал спонтанного излучения обнаружен в обоих примесях (сурьма и мышьяк). Были исследованы

зависимости сигнала фотолюминесценции от интенсивности возбуждения. В образцах Ge:As с концентрацией примесных центров  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  наблюдался сигнал с явным насыщением при величинах интенсивности порядка  $100 \text{ кВт/см}^2$ . Эта величина может быть использована в качестве оценки скорости захвата, которая, зависит от интенсивности возбуждения при данной концентрации и температуре. При сечении фотоионизации  $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$  для кванта 117 мэВ [3] и интенсивности  $100 \text{ кВт/см}^2$  темп фотоионизации составил  $10^9 \text{ с}^{-1}$ . Соответствующий темп захвата является предельным при данных концентрациях центров, если пользоваться данными из литературы и подтверждает причину возникновения насыщения, которой является оголение примеси накачкой. Знание полосы приемников и фильтра позволяет сказать, что наблюдаемый сигнал лежит в ТГц диапазоне. Оба наиболее сильных перехода  $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$  и  $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$  с частотами 1.25 ТГц (5.2 мэВ) и 2 ТГц (8.2 мэВ) попадают в полосу чувствительности приемника *n*-GaAs, однако кроме этого фиксировались и кванты соответствующие переходам в основное состояние примеси из тех же возбужденных состояний. Все эти переходы также вносят вклад в интегральную фотолюминесценцию. Увеличение концентрации примесных центров в образцах до значений  $N_d \sim 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  не приводило к каким-либо выраженным эффектам усиления, а зависимость сигнала от интенсивности накачки также имела тенденцию к насыщению, но при больших интенсивностях. Измерения фотолюминесценции в деформированном образце проводились в условиях, аналогичных описанным выше для недеформированного кристалла. Величина давления рассчитывалась исходя из площади торца образца и веса груза. Давление в эксперименте могло составлять от 0 до 1.5 кбар, что соответствует диапазону максимального изменения

энергии основного состояния от 14.18 до ~11.7 мэВ. При этом состояния триплета теряют вклады нижней долины, что сказывается на времени релаксации состояния  $2p_0$ . С одной стороны, это должно вести к увеличению сигнала фотолюминесценции. Однако, с другой – в такой системе становится нереализуема 4-х уровневая схема усиления. Таким образом, в эксперименте наиболее интересным оказался диапазон экстремально низких давлений, когда в релаксации  $2p_0$  еще участвуют переходы в состояния триплета. Было зарегистрировано спонтанное излучение при различных уровнях возбуждения. Зависимость сигнала от интенсивности при нулевом давлении носила слабо выраженный нелинейный характер, который сохранялся и для слабых давлений (не более 200 бар, Рис.1). При увеличении давления сигнал спонтанного излучения падал по величине и зависимость становилась выражено линейной вплоть до интенсивностей 100 кВт/см<sup>2</sup>. Таким образом, есть признаки, что при малых давлениях в Ge:As реализуется усиление. Исследование сигнала из образцов с большей концентрацией примеси не выявило признаков усиления. Однако такое поведение ожидаемо, поскольку увеличение концентрации приводит к уширению линий примесных переходов, а значит, снижению коэффициента усиления (“net gain”). Параллельно с поиском спонтанного излучения были проведены работы по детектированию модуляции фонового поглощения, прошедшего через образец. Так, проведены измерения сигнала модуляции излучения лампы обратной волны (ЛОВ, в диапазоне частот 160–240 ГГц) при возбуждении мелкого донора в германии излучением CO<sub>2</sub> лазера. Во всем диапазоне модуляция имела характер поглощения и интерпретируется как поглощение свободными носителями и слабо зависят от величины давления. Германиевые кристаллы охлаждались до температуры  $T \sim 4-30$  К с использованием оптического криостата на базе рефрижератора замкнутого цикла. В качестве входного окна для излучения накачки (CO<sub>2</sub> лазер) использовался ZnSe, а для зондирующего излучения – кварц. В эксперименте использовалась частота ~0,24–0,25 ТГц с возможностью некоторой отстройки, что соответствует  $2p_{\pm} \rightarrow 5s$  переходу в примесных центрах. В качестве приемника использовался диод Шоттки с соответствующей электронной аппаратурой (усилитель). Сигнал модуляции излучения ЛОВ при оптическом возбуждении имел

ярко выраженную резонансную природу и температурную зависимость, достигая максимума при  $T=4$  К и не регистрировался при температурах более 15 К. Исследование коэффициента поглощения в дальнем ИК диапазоне с использованием квантово-каскадного лазера (ККЛ) на частоте порядка 3.4 ТГц (14.1 мэВ), близкой к энергии ионизации донора мышьяка в германии в отсутствие деформации кристалла (14.18 мэВ) показало, что при малых и нулевых давлениях сигнал модуляции излучения ККЛ был максимален, имел характер просветления, а зависимость от интенсивности имела тенденцию к насыщению. Данная зависимость соответствует истощению примеси при больших уровнях накачки. Дальнейшее увеличение давления приводило к снижению сигнала модуляции излучения ККЛ и переходу зависимости модуляции к линейному закону. Снижение сигнала модуляции можно связать с уменьшением сечения поглощения на фиксированной частоте в зону проводимости для переходов из основного состояния ввиду уменьшения энергии связи последнего.

Работа поддержана проектом РНФ 19-72-20163.

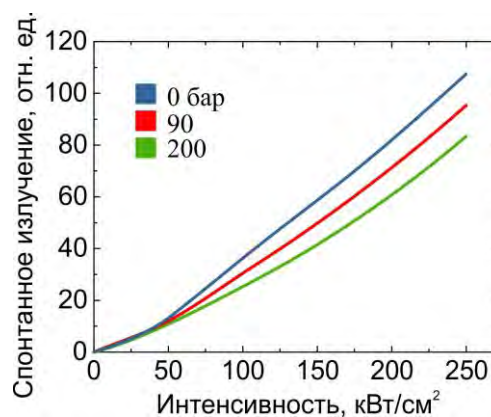


Рис. 1. Зависимость сигнала спонтанного излучения от интенсивности накачки CO<sub>2</sub> лазера в недеформированном кристалле Ge:As

## Литература

1. Р. Х. Жукавин, К.А. Ковалевский, С.М. Сергеев и др. // Письма в ЖЭТФ, 106, 555 (2017).
2. Р.Х. Жукавин, К.А. Ковалевский, Ю.Ю. Чопорова и др. // Письма в ЖЭТФ, 110, 677 (2019).
3. Бейнихес И.Л., Коган Ш.М. // Письма в ЖЭТФ, т. 44, 39 (1986).



# Захват дырок на состояния вакансий ртути в узко зонных слоях HgCdTe с испусканием одиночного акустического фонона

Д.В. Козлов<sup>1, 2, \*</sup>, В.В. Румянцев<sup>1, 2</sup>, С.В. Морозов<sup>1, 2</sup>, В.И. Гавриленко<sup>1, 2</sup>, Н.-W. Hübers<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород.

<sup>2</sup> Нижегородской государственной университет им. Лобачевского, Нижний Новгород.

<sup>3</sup> Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin, Newtonstr. 15, 12489 Berlin, Germany.

\*dvkoz@ipmras.ru

Были рассчитаны интенсивности переходов дырок из валентной зоны узкозонных твердых растворов HgCdTe на локализованные состояния вакансий ртути при испускании одиночного акустического фонона. Определено соотношение между интенсивностями безызлучательных переходов на локализованные состояния вакансий ртути. Показано, что на возбужденные уровни такие переходы должны идти в 3-4 раза интенсивнее, чем на основное состояние.

Твердые растворы  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  (КРТ) исследуются уже свыше четырех десятилетий [1,2]. Интерес к таким структурам вызван возможностью подбирая состав твердого раствора менять ширину запрещенной зоны материала. Эта ширина меняется от 1.6 эВ в чистом CdTe до 0 в твердом растворе с долей Cd меньше 16.5 %. Следует также отметить, что в твердом растворе с низкой долей Cd реализуется инвертированная зонная структура – дырочные  $\Gamma$  – подобные подзоны, перекрываются с электронными, и в  $\Gamma$  – точке дырочные состояния оказываются по энергии выше электронных. Описанное выше фундаментальное свойство КРТ материалов является причиной ряда замечательных эффектов в узкозонных объемных КРТ пленках и для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{HgTe}$  гетероструктур с квантовыми ямами: Это инвертированная и нормальная зонная структура в гетероструктурах с КЯ в зависимости от ширины ямы, топологически защищенные состояния, низкие эффективные массы в зоне проводимости. Все это делает структуры на основе КРТ перспективным материалом для создания детекторов и источников излучения дальнего и среднего инфракрасного диапазона. Одна из главных проблем при создании таких источников – уменьшение времени жизни носителей из-за рекомбинации по механизму Шокли –Рида - Холла (SRH) через примесно – дефектные центры. Наиболее распространенным дефектом КРТ оказывается вакансия ртути. Этот дефект возникает в КРТ материалах благодаря слабости химической связи ртуть — теллур. Вакансия ртути является двухвалентным или двойным акцептором. Такой акцептор может находиться в трех зарядовых состояниях: С акцептором мо-

жет быть связаны две дырки. Это нейтральных  $A_2^0$  центр, с акцептором может быть связана одна дырка. Это — частично ионизованный  $A_2^{-1}$  центр, и, наконец, акцепторный центр может быть свободен от дырок. Это — полностью ионизованных  $A_2^{-2}$  центр.

Рекомбинация по ШРХ механизму может быть как безызлучательной, с испусканием фононов, так и излучательной. Эти процессы конкурируют друг с другом, а излучательная рекомбинация по ШРХ механизму проявляется в виде линий примесной фотолуминесценции (ФЛ), расположенных с спектре ФЛ КРТ слоев левее полосы межзонных переходов. Отличительной особенностью таких линий является то, что они, в отличие от линий, связанных с межзонными переходами не смещаются в коротковолновую область при росте температуры, приводящем к увеличению ширины запрещенной зоны КРТ материала.

Линии примесной ФЛ из эпитаксиальных слоев КРТ были обнаружены в работах [3,4]. В работе [4] из объемного слоя твердого раствора КРТ с долей Cd  $x=0.19$  и шириной запрещенной зоны около 50 мЭВ наблюдалась длинноволновая полоса примесной ФЛ, соответствующая энергиям квантов до 11 мЭВ. В работе [4] было показано, что описанная выше полоса ФЛ связана с захватом дырок на состояния нейтральной вакансии ртути. Таким образом, доля излучательных переходов между состояниями акцепторов оказалась значительной. Следует отметить, что энергия ионизации нейтральной вакансии ртути (около 11 мЭВ [2]) оказывается меньше энергии оптического фонона (около 15 мЭВ), поэтому в



процессах захвата дырок на состояния такого центра участвуют только акустические фононы. Целью настоящей работы является оценка интенсивности безызлучательного захвата дырок на локализованные состояния нейтральной вакансии ртути ( $A_2^0$  центра).

Известно, что в полярном полупроводнике взаимодействие носителей с фононами происходит как с помощью микрополя – деформационного потенциала, вызванного искажением идеального периодического потенциала кристаллической решетки (деформационное взаимодействие с фононами), так и с помощью макрополя – поля наведенной смещением атомов объемной поляризации (пьезо взаимодействие). Следует отметить, что в полупроводниках типа  $A_2B_6$  более существенным оказывается пьезо взаимодействие. Таким образом для переходов дырок на мелкие (с энергией ионизацией меньше оптического фонона) акцепторные уровни в КРТ материалах нужно рассчитывать скорости процессов связанных с возбуждением акустических колебаний (испускания акустических фононов) с помощью пьезо потенциала. Вероятность испускания одиночного фонона можно найти по золотому правилу Ферми:

$$W_{con \rightarrow f} = \sum_{cont} \left| \langle \Psi_{cont} | \hat{V} | \Psi_f \rangle \right|^2 \delta(\varepsilon_{cont} + \hbar\omega - \varepsilon_f)$$

Где  $\Psi_{cont}, \Psi_f, \varepsilon_{cont,f}$  – волновые функции и энергии состояний непрерывного спектра и локализованного уровня нейтральной вакансии ртути соответственно.  $\hat{V}$  – электростатический потенциал взаимодействия дырок с фононами. Для фононной волны с частотой  $\omega$  и волновым вектором  $q$ , выражение для такого потенциала в случае сферической симметрии, согласно [5] имеет следующий вид:  $\hat{V} = \beta / \omega^{1/2}$ , где  $\beta$  – пьезоэлектрическая константа. Отметим, что для КРТ раствора значение этой константы до сих пор неизвестно, поэтому расчет интенсивностей переходов был выполнен в произвольных единицах. Такой расчет позволяет сравнить скорости безызлучательного захвата дырок на различные локализованные состояния вакансии ртути.

Результаты расчета интенсивностей переходов представлены в таблице 1. В первом столбце представлены энергии ионизации локализованных состояний нейтральной вакансии ртути. Во втором столбце – вероятность захвата дырок в единицу

времени на состояние с соответствующей энергией. Видно, что интенсивности захвата носителей на возбужденные акцепторные уровни в 3-4 раза больше, чем на основное состояние.

**Таблица 1.** Спектр нижних (основного и нижних возбужденных состояний  $A_2^0$  центров вакансий ртути в растворе КРТ с долей Cd  $x = 19$  и вероятность в единицу времени захвата дырки из валентной зоны

Энергия ионизации состояния (мэВ)	Вероятность в единицу времени захвата дырки из валентной зоны (а.е.)	Энергия перехода с основного уровня (мэВ)
10.8	25	-
6.99	77	3.81
3.8	105	7
3	110	7.8

Такое соотношение интенсивностей безызлучательных переходов дырок на различные локализованные уровни может приводить к тому, что носители на возбужденные состояния захватываются с испусканием акустических фононов, а при захвате дырок из валентной зоны на основное состояние доминирует излучательный переход.

Это обстоятельство должно привести к формированию длинноволнового фронта полосы примесной ФЛ около 4 мэВ – энергии перехода между основным и нижним возбужденным состояниями. (см. столбец 3 таблицы 1)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 21-52-12020).

## Литература

1. D.L. Polla, and C.E. Jones, Journal of Applied Physics. **51**(12), 6233 (1980).
2. V.V.Rumyantsev, *at all*/ Semicond. Sci. Technol. **32** (2017) 095007 (9pp)
3. Д.В.Козлов и др. ЖЭТФ 154(6), 1226-1231 (2018)
4. Д. В. Козлов, В. В. Румянцев и др.. Письма в ЖЭТФ, 109, 679 – 684 (2019).
5. Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. Москва, Наука, 1984.

# Излучательный внутрицентровый переход в ионе Fe<sup>2+</sup> в теллуриде кадмия

В.И. Козловский<sup>1</sup>, Ю.В. Коростелин<sup>1</sup>, В.С. Кривобок<sup>1</sup>, Д.Ф. Аминев<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ФИАН, Ленинский проспект, 53, Москва, 119991.

\*amdenis@yandex.ru

Впервые зарегистрирована низкотемпературная (8К) люминесценция внутрицентровых переходов  ${}^5T_2 \rightarrow {}^5E$ ,  ${}^3T_1 \rightarrow {}^5T_2$ ,  ${}^3T_1 \rightarrow {}^5E$  в ионе железа в теллуриде кадмия.

## Введение

Расширение диапазона перестраиваемых лазеров на область длин волн больше 5,5 мкм стимулирует интерес к исследованию кристаллов CdTe легированных железом. В этом направлении достигнут значительный прогресс [1]. Однако до сих пор не опубликованы данные по люминесценции ионов железа 2+ в теллуриде кадмия.

## Рост кристалла

Кристалл CdTe лазерного качества легированный железом был выращен в ФИАН при помощи оригинального метода [2]. Методика основана на парофазном переносе примесей в атмосфере He в процессе свободного роста кристалла. Основными особенностями технологии является использование двух отдельных источников – поликристаллического материала II-IV и примеси. А также индивидуальный контроль скорости потока материала II-IV и легирующей примеси. При помощи этого метода выращены легированные монокристаллы Fe: CdSe [2], Fe: ZnTe[3], Fe: CdTe[1], в которых реализована лазерная генерация.

Исследованный кристалл был вырезан из були, выращенной в атмосфере He при температуре 1250 К. Во время охлаждения печи були отжигались 24 часа при температуре 1080 К. Концентрация ионов железа  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

## Люминесценция

Измерения низкотемпературной фотолюминесценции (8 К) проводились при помощи установки на основе монохроматора ИКС-31 с решеткой 150 шт/мм. Образец помещался в проточный оптиче-

ский криостат с окном из ZnSe. Люминесценция возбуждалась при помощи лазерного диода InGaAs, длина волны 995 нм, мощность 300 мВт. Излучение собиралось сферическим зеркалом и фокусировалось на щель монохроматора, приемник – МСТ D 313. Сигнал приемника регистрировался при помощи синхронного усилителя SR830.

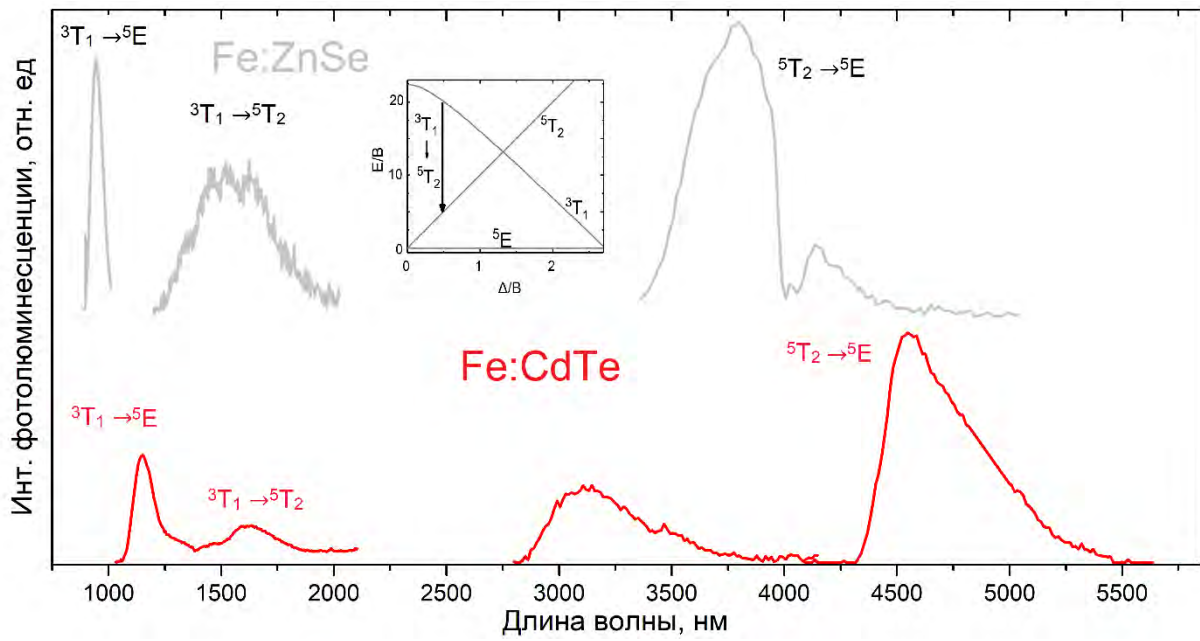
## Обсуждение результатов

Спектр фотолюминесценции Fe: CdTe приведен на рис. 1. На спектре видны несколько полос излучения. Для предварительной интерпретации наблюдаемую картину можно сравнить с известными излучательными переходами в ионе железа 2+ в похожем соединении, в кристаллах ZnSe. Три из 4-х наблюдаемых линии можно с уверенностью интерпретировать как переходы для центра Fe: CdTe: линия с максимумом 1150 нм соответствует переходу  ${}^3T_1 \rightarrow {}^5E$ , линия 1600 нм – переходу  ${}^3T_1 \rightarrow {}^5T_2$ , а линия 4550 нм – переходу  ${}^5T_2 \rightarrow {}^5E$ . Также в спектре присутствует полоса излучения с максимумом в районе 3100 нм, которую мы связываем с излучением глубоких центров связанных с собственными дефектами CdTe.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 19-79-30086)

## Литература

1. М. Р. Frolov, Y. V. Korostelin, V. I. Kozlovsky, *et al.* // Opt. Lett., 44(22), 5453 (2019).
2. V. I. Kozlovsky, V. A. Akimov, M. P. Frolov, *et al.* // Phys. Stat. Sol. (B), 247(6), 1553 (2010).
3. М. Р. Frolov, Y. V. Korostelin, V. I. Kozlovsky, *et al.* // J. Russ. Laser Res., 32(6), 528 (2011).



**Рис. 1.** Спектр фотолуминесценции Fe:CdTe. Для иллюстрации приведены линии излучения Fe:ZnSe. На вкладке приведена диаграмма Танabe-Сугано

# Образование бинарного InAs на поверхности InP(001) при отжиге в потоке мышьяка

Д.А. Колосовский\*, Д.В. Дмитриев, С.А. Пономарев, А.И. Торопов, К.С. Журавлев

1 Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*d.kolosovsky@isp.nsc.ru

Методом атомно-силовой микроскопии показано формирование InAs областей на поверхности подложек InP(001) отожженных в потоке мышьяка в сверхвысоком вакууме. Показано, что области InAs распложены неоднородно по поверхности, имеют вытянутую форму в направлении  $[1 \bar{1} 0]$ . Размер и плотность областей InAs увеличивается с повышением температуры отжига.

## Введение

Подложки InP(001) активно используются для создания гетероэпитаксиальных структур современных приборов опто- и микроэлектроники [1]. Эпитаксиальный рост гетероструктуры является многостадийным процессом. Первым этапом является высокотемпературный отжиг поверхности подложки для очистки от пассивирующего окисного слоя [2]. Значительное количество оксидов индия удаляется с поверхности при температуре 453 °С, а оксидов фосфора — при 458 °С, не вызывая разложения поверхности. Однако для полного термического удаления оксидов необходимо поднимать температуру подложки выше температуры неконгруэнтного разложения InP [3]. Поэтому для предотвращения разложения поверхности прогрев InP-подложек осуществляется в потоке фосфора или мышьяка. Выбор мышьяка в качестве элемента V-той группы обусловлен его лучшей технологичностью в отличие от фосфора. Такая система обеспечивает наилучшую степень очистки подложки и отсутствие фонового фосфора, который может встраиваться в последующие эпитаксиальные слои и приводить к нежелательным изменениям их характеристик.

При этом на поверхности подложки происходят значительные изменения морфологии [3-6]. В процессе отжига на поверхности формируется слой InPAs [3-5]. Толщина и состав этого слоя зависят от температуры отжига подложки InP(001) в потоке мышьяка. Однако на поверхности могут формироваться локальные области с повышенным содержанием мышьяка [3, 6], которые приводят к формированию дефектов в выращиваемых эпитаксиальных слоях из-за рассогласования постоянных решетки между подложкой - переходным слоем - эпитаксиальным слоем. В настоящей работе изучено форми-

рование областей с повышенным содержанием мышьяка.

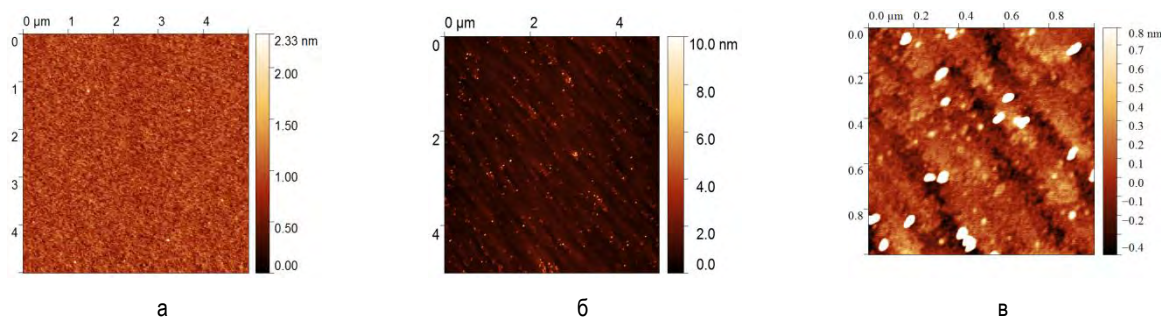
## Оборудование и экспериментальная методика

Отжиг образцов проводился в сверхвысоковакуумной камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Riber Compact-21T оснащенной системой дифракции быстрых электронов на отражение для *in situ* анализа процессов происходящих на поверхности подложки. Для исследований использовались *epi-ready* подложки InP(001) фирмы AXT. Температура подложки ( $T_{sub}$ ) контролировалась инфракрасным пирометром «Ircan Modline Plus». Вентильный источник мышьяка модели VAC 500 позволяет варьировать поток ( $F_{As}$ ) в диапазоне  $5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-5}$  Торр. Анализ поверхности исследуемых образцов проводился с помощью атомно-силового микроскопа Bruker MultiMode 8.

## Экспериментальные результаты и обсуждения

На рисунке 1 представлены АСМ изображения поверхности образцов, отожженных при  $T_{sub} = 500$  °С,  $F_{As} = 5 \times 10^{-6}$  Торр (а) и  $T_{sub} = 540$  °С,  $F_{As} = 2.5 \times 10^{-5}$  Торр (б), на которых наблюдаются островки InAs [6]. Для  $T_{sub} = 500$  °С высота островков над террасой варьируется от 0.5 до 1 нм. Плотность островков составила  $4.4 \times 10^7$  см<sup>-2</sup>.

Островки InAs вытянуты в направлении  $[1 \bar{1} 0]$  и имеют латеральные размеры от 79 до 130 нм, а в направлении  $[1 1 0]$  от 40 до 90 нм. Для  $T_{sub} = 540$  °С высота островка над террасой составляет 0.9 до 2 нм. Плотность островков  $1.8 \times 10^8$  см<sup>-2</sup>. Латеральный размер в направлении  $[1 \bar{1} 0]$  изменяется от 65 нм до 90 нм, а вдоль направления  $[1 1 0]$  от 40 до 60 нм.



**Рис. 1.** АСМ изображения морфологии поверхности подложки InP(001) после высокотемпературного отжига в потоке мышьяка: (а)  $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ ,  $T_{Sub} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F_{As} = 5 \times 10^{-6} \text{ Торр}$ ; (б)  $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ ,  $T_{Sub} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F_{As} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ Торр}$ ; (в)  $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ ,  $T_{Sub} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F_{As} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ Торр}$

На рисунке 1в представлено  $1 \times 1 \text{ мкм}^2$  АСМ изображение морфологии поверхности подложки InP отожжённой при  $T_{Sub} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ . Видно, что островки расположены на краях моноатомных ступеней.

Причиной появления этих островков является сегрегация индия и десорбция фосфора при температуре отжига подложки, которая выше температуры диссоциации поверхности InP. В результате на поверхности образуется избыточная концентрация атомов индия, которые мигрируют по поверхности. Согласно теории роста Бартона-Кабреры-Франка (БКФ) в изломе моноатомной ступени наименьшая энергия связи и встраивание в излом атомов, находящихся на расстоянии длины диффузии от излома моноатомной ступени, наиболее вероятно. Поэтому в излом моноатомной ступени встраиваются атомы индия и мышьяка, в потоке которого происходит процесс отжига. В результате образуется InAs зародыш, который разрастается.

Вытянутость областей InAs вдоль направления  $[1 \bar{1} 0]$  связана с различными коэффициентами диффузии атомов индия вдоль направлений  $[1 \bar{1} 0]$  и  $[110]$ . По теории БКФ, скорость роста моноатомной ступени связана с первым законом Фика, поэтому поток атомов, встраивающихся в излом, зависит от концентрации атомов на поверхности и от коэффициента диффузии. В структуре цинковой обманки направления  $[1 \bar{1} 0]$  и  $[1 1 0]$  не эквивалентны, что приводит к анизотропии коэффициентов диффузии атомов III группы вдоль направлений  $[1 \bar{1} 0]$  и  $[1 1 0]$ . Меньшая энергия активации диффузии в направлении  $[1 \bar{1} 0]$  приводит к боль-

шему коэффициенту диффузии и, как следует из теории БКФ, к большей скорости роста в направлении  $[1 \bar{1} 0]$ .

Таким образом, в работе методом АСМ показано формирование локальных InAs областей на поверхности подложек InP(001) отожжённых в потоке мышьяка. Плотность и размер таких областей увеличивается с увеличением температуры отжига. Локальные области InAs расположены неоднородно по поверхности, имеют вытянутую форму преимущественно вдоль направления  $[1 \bar{1} 0]$ .

## Литература

1. K.S. Zhuravlev, A. L. Chizh, K. B. Mikitchuk *et al.* // *J. Semicond.*, V. 43, 012302 (2022).
2. Д.В. Дмитриев, Д.А. Колосовский, А.И. Горюпов и др. // *Автометрия*, Т. 57, № 5, 11-17, (2021).
3. D.V. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, T.A. Gavrilova *et al.* // *Surface Science*, V. 710, 121861 (2021).
4. Д.В. Дмитриев, Д.А. Колосовский, Е.В. Федосенко и др. // *ФТП*, Т. 55, №10, 877-881 (2021).
5. D.V. Dmitriev, I.A. Mitrofanov, D.A. Kolosovsky *et al.* // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 5-8 (2020).
6. D.A. Kolosovsky, D.V. Dmitriev, T.A. Gavrilova *et al.* // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 17-21 (2021).

# Исследование влияния отжига на инфракрасную фотолюминесценцию наногетероструктур GeSiSn/Si

Д.В. Коляда<sup>1,\*</sup>, Д.Д. Фирсов<sup>1</sup>, В.А. Тимофеев<sup>2</sup>, В.И. Машанов<sup>2</sup>, А.А. Караборчев<sup>1</sup>, О.С. Комков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им А. В. Ржанова СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090

\*kolyada.dima94@mail.ru

Работа посвящена исследованию фотолюминесценции наногетероструктур с множественными квантовыми ямами  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$ , выращенных на кремниевой подложке и отожженных при различных температурах. Продемонстрировано увеличение интенсивности пика излучения, близкого по энергии к межзонным переходам. На основе данных температурной зависимости фотолюминесценции определена температура, соответствующая средней фононной частоте и параметр, описывающий силу электрон-фононного взаимодействия.

## Введение

Применение твёрдого раствора GeSiSn, совместимого с кремниевой технологией, открывает широкие возможности для создания фотонных устройств, работающих в среднем ИК диапазоне. На сегодняшний день удаётся получить излучающие и фотоприёмные структуры на основе GeSiSn, выращиваемые на буферном слое германия [1,2]. Однако подобные структуры содержат достаточно большое количество дислокаций, в то время как варьируя состав  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ , возможно выращивать бездислокационные напряжённые слои на кремнии. Во избежание релаксации упругих напряжений в подобных слоях используются структуры  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$ , исследованию фотолюминесценции которых посвящена данная работа.

## Образцы и методика эксперимента

В работе исследовались наногетероструктуры с множественными квантовыми ямами (МКЯ), состоящими из 10 периодов чередующихся слоев  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$  с толщинами 1 – 4 нм и 7 нм, соответственно. Образцы выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках КДБ-10(100) с буферным слоем эпитаксиального кремния толщиной 150 нм. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) исследуемых структур были получены с помощью измерительной схемы [3] на основе фурье-спектрометра VERTEX 80 и гелиевого криостата Janis CCS-150. Оптическая накачка производилась с помощью лазера с длиной волны

405 нм. Детектирование осуществлялось фотоприёмником InSb, охлаждаемым жидким азотом.

## Результаты и обсуждение

Для исследуемых образцов был проведён отжиг при различных температурах с целью уменьшения влияния дефектов на их люминесцентные свойства. Зависимость спектров ФЛ от температуры отжига на примере структуры с толщиной слоёв  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$ , равной 1 нм, представлена на рис. 1.

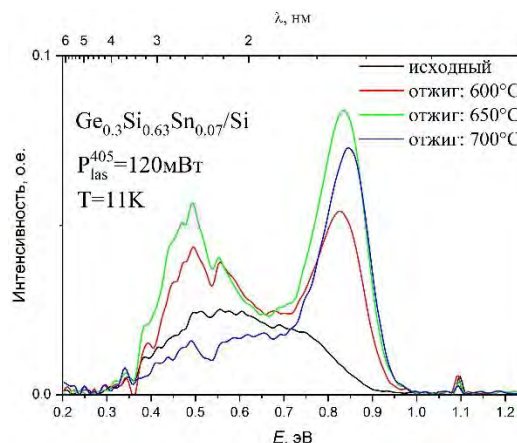


Рис. 1. Зависимость спектров фотолюминесценции структуры с МКЯ  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$  от температуры отжига

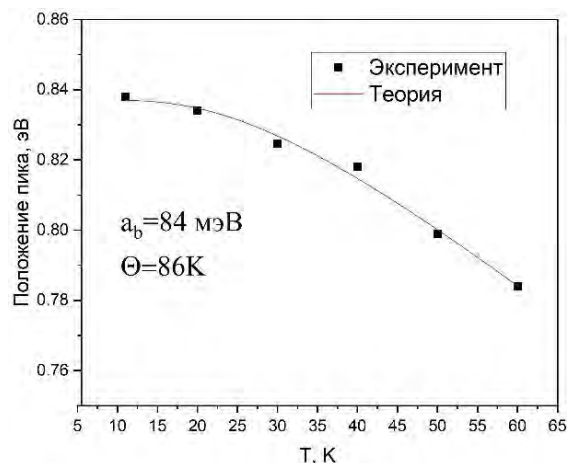
В спектре исходного неотожженного образца наблюдается широкая полоса ФЛ в диапазоне энергий от 0.35 до 0.9 эВ, в пределах которой в результате отжига выделяются два отдельных пика. Длинноволновый пик, лежащий в диапазоне энергий от 0.35 до 0.65 эВ с максимумом около 0.5 эВ, находится существенно ниже по энергии, чем рас-



чётная ширина запрещённой зоны  $E_g$  для  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  [4]. Для выявления его природы нами была рассмотрена температурная зависимость ФЛ, которая продемонстрировала достаточно высокую стабильность (пик сохранялся вплоть до 200 К). В то же время в спектрах не наблюдалось смещения положения данного сигнала при изменении температуры, а анализ мощностных зависимостей люминесценции выявил сублинейный рост интенсивности ФЛ с увеличением мощности накачки. Наличие полос люминесценции ниже  $E_g$  указывает на излучательную рекомбинацию с участием дефектов – вероятно, через возникающие в твёрдом растворе  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  комплексы, образуемые с участием вакансий (подобно комплексам “олово-вакансия” в кремнии [5]). При температуре отжига 700°C интенсивность данного пика существенно снижается, что свидетельствует об уменьшении концентрации соответствующего типа излучающих дефектов.

В коротковолновой области спектра в результате отжига становится выражен отдельный пик с энергией ~0.83 эВ, интенсивность которого возрастает при повышении температуры отжига до 650°C. Сопоставление результатов для серии структур показало, что данный пик сдвигается в сторону меньших энергий с увеличением толщины слоя  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  от 1 до 4 нм. Учитывая, что положение данного пика близко к расчётным значениям энергии оптического перехода в напряженном слое  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$ , полученные данные позволяют предположить, что этот сигнал соответствует межзонной люминесценции. Увеличение интенсивности коротковолнового пика с ростом температуры отжига можно объяснить снижением концентрации точечных дефектов в слоях  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$ , способствующих безызлучательной рекомбинации. На рис. 1 также заметен небольшой сдвиг пика в коротковолновую область с повышением температуры отжига. Этот сдвиг может быть вызван снижением концентрации олова в слое  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}$  вследствие диффузии Sn в соседние области.

Для коротковолнового пика ФЛ также была рассмотрена его температурная зависимость, которая характеризуется резким спадом интенсивности при повышении температуры и большим сдвигом положения пика – на 50 мэВ при изменении  $T$  с 11 до 60 К (рис. 2). Столь существенная величина сдвига не позволяет описать полученные данные известной эмпирической формулой Варшни.



**Рисунок 2.** Температурная зависимость положения пика межзонной ФЛ структуры МКЯ  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.63}\text{Sn}_{0.07}/\text{Si}$ .

Для аппроксимации полученных результатов было выбрано выражение, содержащее статистический фактор Бозе-Эйнштейна и учитывающее электрон-фононное взаимодействие [6].

$$E_0(T) = E_0(0) - \frac{2a_b}{\exp\left(\frac{\Theta}{T}\right) - 1},$$

где  $\Theta=86\text{К}$  – температура, соответствующая средней фононной частоте,  $a_b=84\text{мэВ}$  – параметр, описывающий силу электрон-фононного взаимодействия. Данный результат говорит о существенном вкладе электрон-фононного взаимодействия в температурный сдвиг пика ФЛ при малых температурах, по сравнению с термическим расширением.

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

## Литература

1. I. A. Fischer, T. Wendav, L. Auge *et al.* // Opt. Exp., 23, 25048 (2015).
2. J. D. Gallagher, C Xu., C. L Senaratne *et al.* // JAP 118, 135701 (2015).
3. D. D. Firsov, O. S. Komkov, V. A. Solov'ev *et al.* // J. of Phys. D: Appl. Ph, 49, 285108 (2016).
4. V. A. Timofeev *et al.* // Nanotechnology, 29, 154002 (2018).
5. L. Scheffler, M J Hastrup, S Roesgaard *et al.* // Nanotechnology, 29, 055702 (2018).
6. M. Munoz, F. H. Pollak, M. B. Zakia *et al.* // Physical Review B, V. 62, 16600 (2000).

# Ионно-лучевой синтез нанокристаллов оксида галлия в диэлектрических матрицах

Д.С. Королев\*, А.А. Никольская, К.С. Матюнина, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.В. Нежданов, Р.Н. Крюков, А.В. Здоровейцев, А.А. Конаков, Д.И. Тетельбаум

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

\*dmkoroлев@phys.unn.ru

Исследовано влияние режимов ионно-лучевого синтеза на процессы формирования и свойства нанокристаллов оксида галлия в диэлектрических матрицах  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии изучено перераспределение имплантированной примеси в зависимости от условий синтеза. Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции исследованы структурные и светоизлучающие свойства синтезированных образцов.

## Введение

Исследование материалов на основе оксида галлия привлекает огромный интерес благодаря его уникальным физическим свойствам, в первую очередь, большой ширине запрещенной зоны и высоким значением пробивного напряжения, что позволит в перспективе использовать этот материал в приборах силовой электроники. Другим перспективным применением оксида галлия является создание на его основе «солнечно-слепых» фотодетекторов и газовых сенсоров [1]. Однако, широкое использование этого материала ограничивается низкой доступностью и достаточно высокой стоимостью монокристаллических подложек. Методы создания кристаллических пленок на подложках, такие как эпитаксия, осаждение из газовой фазы и другие, сталкиваются с трудностью получения структурно совершенных слоев с воспроизводимыми параметрами.

Одним из возможных вариантов применения материалов на основе оксида галлия может служить создание нанокристаллов (НК) этого соединения. Уменьшение кристаллических включений до размеров менее 100 нм благодаря квантово-размерным эффектам позволит получить уникальные свойства, не присущие этому материалу в объемном состоянии. К настоящему моменту известны только химические методы синтеза НК  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Так, для коллоидных растворов НК  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  было продемонстрировано наличие люминесценции в УФ, синей и зеленой части спектра в зависимости от размера частиц [2], а также предложен способ управления параметрами люминесценции путем изменения концентрации дефектов в НК [3]. Также сообщалось о синтезе НК  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в германосиликатных

стеклах различного состава, для которых также была продемонстрирована наличие фотолюминесценции в УФ и видимой части спектра [4]. Однако, эти методы оказываются плохо совместимыми с современными технологическими процессами микро- и наноэлектроники.

Одним из перспективных методов создания НК  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  может являться ионно-лучевой синтез таких нановключений в диэлектрических матрицах. Этот метод позволяет проводить контролируемый синтез нановключений с заданными параметрами, а также дополнительную модификацию их свойств путем вариации режимов ионного облучения и термообработки. Важным преимуществом этого метода является его полная совместимость с микроэлектронной технологией. Ранее нами была продемонстрирована принципиальная возможность создания структур с ионно-синтезированными НК  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , на основе которых были созданы фотоприемники с рекордными характеристиками по фоточувствительности [5]. В настоящей работе приводятся результаты исследования процессов формирования и свойств ионно-синтезированных нанокристаллов  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в диэлектрических матрицах.

## Методика эксперимента

В качестве исходных образцов использовались пленки  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , нанесенные на подложки КЭФ-4,5 методом электронно-лучевого испарения. Далее образцы облучались ионами  $\text{O}_2^+$  (энергия 45 кэВ, доза  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и  $\text{Ga}^+$  (энергия 80 кэВ, доза  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) с вариацией порядка облучения. Режимы ионного облучения были выбраны для совпадения глубин залегания имплантированных атомов и обеспечения их концентрации не менее 10 ат.%.

Постимплантационный отжиг проводился в инертной и окисляющей атмосферах при температурах 500-900 °С в течение 30 минут.

Исследование свойств образцов проводилось методами комбинационного рассеяния света, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, а также спектроскопии фотолюминесценции.

## Результаты и обсуждение

Для изучения процессов ионно-лучевого синтеза НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в матрицах SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> было предложено несколько вариантов синтеза, отличающихся порядком имплантации и режимами постимплантационного отжига. Использовались три варианта возможного порядка имплантации ионов. Два из них отличались тем, что сначала внедрялись ионы кислорода, потом галлия, и наоборот. Третий вариант предполагал однократную имплантацию ионов галлия без дополнительного облучения кислородом. В данном случае ожидается, что образование НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> возможно при участии атомов кислорода, содержащихся в оксидной матрице. Поведение имплантированных атомов исследовалось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с послойным профилированием. В докладе приводятся профили распределения атомов галлия и избыточных атомов кислорода в зависимости от порядка имплантации. Также анализируется влияние порядка имплантации на профиль распределения атомов галлия, и полученные результаты сравниваются со случаем имплантации только ионов Ga. Также рассматривается перераспределение имплантированных атомов в результате постимплантационного отжига. Получено, что распределение атомов после отжига существенно зависит от диэлектрической матрицы.

Процессы формирования кристаллических фаз исследовались методом комбинационного рассеяния света. Так, в образцах после имплантации в отсутствие отжига не наблюдается появления новых пиков относительно спектров исходных образцов. После отжига появляются пики рамановского рас-

сеяния, связанные с формированием кристаллических включений Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, причем их положение и интенсивность зависят от условий постимплантационного отжига.

Исследование фотолюминесцентных свойств синтезированных образцов при возбуждении УФ-излучением выявило появление новых люминесцентных линий в голубой части спектра, обусловленных синтезом новой фазы. Расшировка полученных спектров требует проведения дополнительных исследований.

Для образцов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si с НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> продемонстрирована возможность создания эффективных фотодетекторов для УФ-диапазона. Формирование нанокристаллов β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> установлено методом просвечивающей электронной микроскопии. Чувствительность фотодетекторов, полученных при отжиге 900 °С, к УФ-излучению составляла 50 мА/мкВт и была обусловлена фотогенерацией носителей заряда в НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с последующим их электрополевым транспортом через матрицу Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10233, <https://rscf.ru/project/21-79-10233/>.

## Литература

1. S. J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary *et al.* // *Appl. Phys. Rev.*, V. 5, 011301 (2018).
2. T. Wang, S.S. Farvid, M. Abulikemu, P.V. Radovanovic // *J. Am. Chem. Soc.*, V. 132, 9250 (2010).
3. T. Wang, P.V. Radovanovic // *Chem. Commun.*, Vol. 47, 7161 (2011).
4. V.N. Sigaev, N.V. Golubev, E.S. Ignat'eva *et al.* // *Nanoscale*, V. 6, 1763 (2014).
5. S. Rajamani, K. Arora, A. Konakov *et al.* // *Nanotechnology*, V. 29, 305603 (2018).

# Исследование теплопроводности твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ , полученных методом электроимпульсного плазменного спекания

М.Г. Короткова<sup>1,2</sup>, М.В. Дорохин<sup>1</sup>, Ю.М. Кузнецов<sup>1,2</sup>, П.Б. Дёмина<sup>1</sup>, И.В. Ерофеева<sup>1</sup>, М.В. Ведь<sup>1</sup>, А.В. Воронин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950, Россия, Нижний Новгород, проспект Гагарина 23а.

<sup>2</sup> Физический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950, Россия, Нижний Новгород, проспект Гагарина 23а.

\*mgk-00@yandex.ru

Проведено исследование теплопроводности твердых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$ , имеющих мелкозернистую поликристаллическую структуру. Измерение коэффициента теплопроводности проводилось методом стационарного теплового потока. Исследования методом сканирующей электронной микроскопии показали наличие в образцах зёрненной структуры различного размера и состава. Исследовано влияние степени перемешивания кремния и германия, а также размера зерна на величину коэффициента теплопроводности.

Твердый раствор  $Si_{1-x}Ge_x$  является перспективным термоэлектрическим материалом, который отличается удовлетворительными термоэлектрическими характеристиками и хорошо отработанной технологией получения [1]. Для повышения конкурентоспособности  $Si_{1-x}Ge_x$  по сравнению с другими источниками энергии необходимо повысить КПД термоэлектрического преобразования. Один из способов повышения КПД – получение материалов с низким значением коэффициента теплопроводности [2]. В частности, большое внимание уделяется методам понижения фоновой составляющей коэффициента теплопроводности [3]. Как правило, это достигается за счёт формирования материала с наноразмерной поликристаллической структурой, в котором дополнительное фоновое рассеяние на границах зёрен приводит к затруднению процессов теплопереноса.

## Исследуемые структуры

В работе были исследованы термоэлектрические материалы на основе твёрдых растворов  $Si_{1-x}Ge_x$ , полученных методом электроимпульсного плазменного спекания [4] (образцы 1 – 4), и контрольные монокристаллические Si (образец 5) и Ge (образец 6). Описание образцов представлено в таблице 1.

Метод электроимпульсного плазменного спекания позволяет формировать поликристаллические структуры с размером зерна от 1 мкм до 100 нм [4]. Синтез образцов проводился в установке электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) DR-SINTER модель SPS-625 Spark Plasma Sintering

System при давлении 70 МПа до температуры 1040 °C со скоростью нагрева 50 °C мин.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов

№ образца	Состав	Средний размер частиц, мкм
1	$Si_{0,65}Ge_{0,35} + P(0,5\%)$	<10
2	$Si_{0,95}Ge_{0,05} + P(1,0\%)$	<10
3	$Si_{0,97}Ge_{0,03} + P(1,0\%)$	<10
4	$Si_{0,95}Ge_{0,05} + P(1,0\%)$ (вводится из SiP)	<4
5	Si(100%)	
6	Ge(100%)	

## Методика эксперимента

Измерение коэффициента теплопроводности проводилось методом стационарного теплового потока [5]. Метод заключается в исследовании распределения стационарного теплового потока в системе, состоящей из двух эталонных структур с известным значением коэффициента теплопроводности, и закреплённым между ними исследуемым образцом. В ходе эксперимента измеряется разность температур между гранями эталонов и образцом. Из отношения этих величин определяется коэффициент теплопроводности исследуемого образца. Для оценки однородности по фазовому составу и определения среднего размера зерна сформированных структур проводились исследования методом сканирующей электронной микроскопии. Карты распределения элементов в структурах были получены методом энергодисперсионной спектроскопии.

## Результаты эксперимента

На рис. 1 представлено характерное электронно-микроскопическое изображение исследуемых образцов. На изображении хорошо виден контраст, соответствующий разному процентному соотношению Ge и Si в различных зёрнах поликристаллической структуры. Результаты оценки среднего размера зерна сформированных образцов по электронно-микроскопическим изображениям представлены в таблице 1.

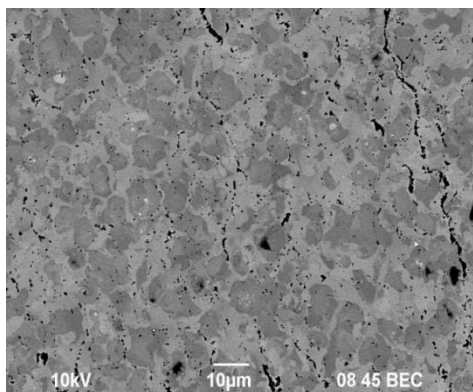


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение полированной поверхности образца 1

Согласно исследованиям состава, области с затемнённым контрастом соответствуют частицам с повышенным содержанием кремния. Для образцов 2, 3 и 4 содержание кремния в этих областях близко к 100 %. Образцы 2 – 4 представляют собой двухфазную систему, включающую частицы нерастворённого кремния микронного размера в матрице твёрдого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Образец 1 является твёрдым раствором переменного состава  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Результаты измерения коэффициента теплопроводности исследуемых спеченных и контрольных образцов представлены на рис.2. Получено, что все поликристаллические спеченные образцы имеют значения коэффициента теплопроводности существенно ниже, чем контрольные монокристаллические Si и Ge. При этом образец 3 имеет самое высокое значение коэффициента теплопроводности, а 1 – самое низкое. Снижению теплопроводности способствует уменьшение размера зерна (ср. образец 2 и 4). Уменьшается теплопроводность образцов и с увеличением концентрации Ge в твердом растворе. По-

этому, за счёт наличия частиц, содержащих 100% кремния в материале, в окружающей матрице  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  повышается общая концентрация Ge, что обеспечивает дополнительное снижение коэффициента теплопроводности.

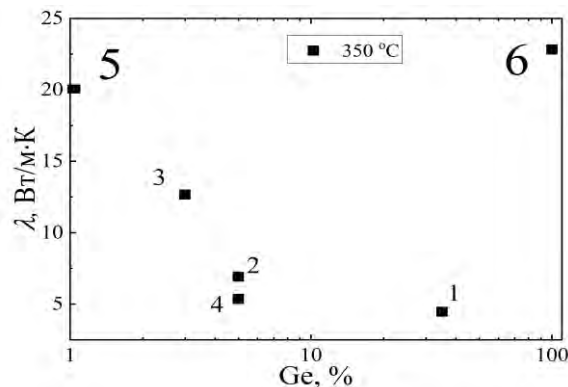


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности при температуре 350 °С от процентного содержания Ge

## Выводы

В работе продемонстрировано влияние неоднородности фазового состава и размера зерна на значение коэффициента теплопроводности твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , полученных методом электроимпульсного плазменного спекания. Показано, что образцы с малым содержанием кремния, не вошедшего в состав твёрдого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , имеют пониженную теплопроводность. Установлено влияние размера зерна на величину коэффициента теплопроводности.

Работа выполнена в рамках выполнения гос. задания (проект 075-03-2020-191/5) и гранта РФФИ (20-32-90032).

## Литература

1. K. Romanjek, S. Vesin, L. Aixala *et al.* // *J. Electron. Mater.*, V. 44, 2192 (2015).
2. A. Lahwal, S. Bhattacharya, J. He *et al.* // *J. Appl. Phys.*, V. 117, 145101 (2015).
3. S. Vives, C. Navone, E. Gaudin *et al.* // *J. Mater. Sci.*, V. 52, 12826 (2017).
4. Z. Shen, M. Johnsson, Z. Zhao *et al.* // *J. Am. Ceram. Soc.*, V. 85, 1921 (2002).
5. Е.Д. Девяткова, А.В. Петров, И.А. Смирнов // *ФТТ*, Т. 2, 738 (1960).

# Резонансное спиновое усиление в условиях электронного парамагнитного резонанса

А.Р. Коротнева<sup>1,\*</sup>, В.В. Белых<sup>1</sup>, Д.Н. Собьянин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский просп., 53, стр., 4, Москва, 1199911.  
\*mao101118@gmail.com

В работе продемонстрирован оптический метод измерения спиновой динамики на основе комбинации эффектов резонансного спинового усиления и электронного парамагнитного резонанса в однолучевой схеме накачки-зондирования на объемном образце n-GaAs.

## Введение

Одним из классических методов наблюдения спиновой динамики является электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) [1]. Сигнал ЭПР может быть детектирован оптически, при помощи регистрации амплитуды радиочастотных колебаний фарадеевского вращения [2], кроме этого при помощи оптической накачки можно добиться усиления сигнала ЭПР [3].

Еще одним методом воздействия на спиновый ансамбль является метод резонансного спинового усиления (РСУ) [4], резонанс в котором достигается при условии кратности Ларморовской частоте частоте повторения оптических импульсов. Этот метод, может быть реализован в однолучевой схеме одновременной накачки и зондирования [5].

## Комбинация методов

В работе [6] мы исследуем результат комбинации этих двух методов, одновременно прикладывая к образцу GaAs n-типа, находящемуся в постоянном магнитном поле (в геометрии Фогта), радиочастотное (РЧ) магнитное поле. В результате мы наблюдаем значительное усиление сигнала ЭПР в условиях РСУ и его подавление вне резонансной оптической накачки (рис. 1). С другой стороны получаем возможность управлять условиями РСУ посредством изменения параметров лишь радиочастотного поля при постоянной накачке.

Вместе с этим, в условиях двойного резонанса мы регистрируем квадратичную зависимость сигнала от амплитуды радиочастотного поля и расщепление частот спектра ЭПР (рис. 2).

Теоретическое описание результатов [6] довольно точно аппроксимирует полученные экспериментальные данные.

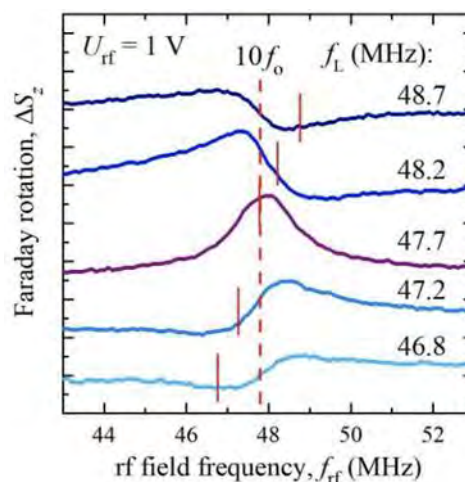


Рис. 1. Сигнал фарадеевского вращения в зависимости от частоты РЧ поля (спектры ЭПР) для различных Ларморовских частот. Красные штрихи показывают положение выполнения условия ЭПР

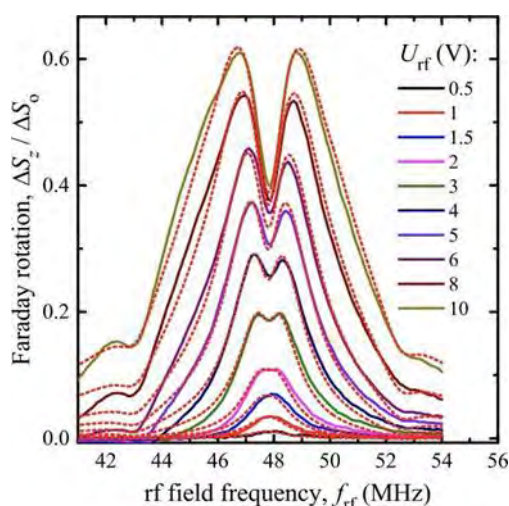


Рис. 2. Спектры ЭПР при различных амплитудах РЧ поля. Пунктирные линии аппроксимацию экспериментальных данных теоретической формулой [6]



## Литература

1. C.P. Poole, *Electron Spin Resonance: A Comprehensive Treatise on Experimental Techniques*, 2nd ed. (Dover Publications, Mineola, NY, 1996).
2. B. C. Cavenett, Optically detected magnetic resonance (O.D.M.R.) investigations of recombination processes in semiconductors, *Adv. Phys.* 30, 475–538 (1981).
3. V.V. Belykh, D.R. Yakovlev, and M. Bayer, Optical detection of electron spin dynamics driven by fast variations of a magnetic field: a simple method to measure  $T_1$ ,  $T_2$ , and  $T_2^*$  in semiconductors, arXiv:2004.09408 (2020).
4. J. M. Kikkawa, D. D. Awschalom, *Phys. Rev. Lett.* 80, 4313 (1998).
5. F. Saeed, M. Kuhnert, I. A. Akimov, V. L. Korenev, G. Karczewski, M. Wiater, T. Wojtowicz, A. Ali, A. S. Bhatti, D. R. Yakovlev, and M. Bayer, *Phys. Rev. B* 98, 075308 (2018).
6. V. V. Belykh, D. N. Sob'yanin, and A. R. Korotneva *Phys. Rev. B* 102, 075201 (2020).

Работа была поддержана Российским научным фондом (проект №18-72-10073-П).

# Исследование влияния оптического излучения на резистивное переключение МДП-структур на основе $ZrO_2(Y)$ на подложках $Si(001)$ с наноструктурами Ge

М.Н. Коряжкина<sup>1,\*</sup>, Д.О. Филатов<sup>1,§</sup>, М.Е. Шенина<sup>1</sup>, И.Н. Антонов<sup>2</sup>, А.В. Круглов<sup>1</sup>, А.В. Ершов<sup>1</sup>, А.П. Горшков<sup>1</sup>, Р.Ю. Окишев<sup>1</sup>, С.А. Денисов<sup>2</sup>, В.Ю. Чалков<sup>2</sup>, В.Г. Шенгуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

\*mahavenok@mail.ru, §dmitry\_filatov@inbox.ru

Исследовано влияние оптического излучения видимого и ближнего ИК диапазонов на резистивное переключение (РП) МДП-структуры на основе плёнок  $ZrO_2(Y)$  на подложке  $n-Si(001)$  с самоформирующимися пирамидальными наноструктурами Ge на её поверхности. Наблюдалось увеличение логического коридора РП при фотовозбуждении, связанное с влиянием фотоЭДС на барьере  $Si/Ge/ZrO_2(Y)$ , в том числе при фотовозбуждении в области энергий квантов, меньших ширины запрещённой зоны Si. В последнем случае эффект связан с пространственно-непрямыми межзонными оптическими переходами в наноструктурах Ge.

## Введение

Мемристоры — элементы нового поколения энергонезависимой компьютерной памяти [1] и нейроморфных вычислительных систем [2]. Их функционирование основано на эффекте резистивного переключения (РП). Формирование мемристоров в виде структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) открывает возможности управления РП оптическим излучением. В [3] обнаружено изменение параметров РП в МДП-структуре  $Zr/ZrO_2(Y)/n-Si$  при фотовозбуждении, связанное с фотоЭДС на барьере  $Si/ZrO_2(Y)$  при межзонном поглощении излучения в Si кванта с энергией  $h\nu > E_g$  ( $E_g$  — ширина запрещённой зоны Si). Это приводило к усилению электрического поля в слое  $ZrO_2(Y)$  и, тем самым, стимулировало РП.

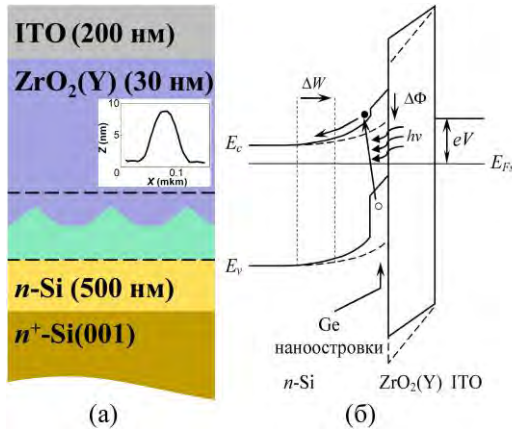
В [4] исследовано влияние излучения с  $h\nu > E_g$  на РП в МДП-структуре  $Zr/ZrO_2(Y)/n-Si$  с островками GeSi на поверхности Si. Предполагалось, что островки GeSi концентрируют электрическое поле в  $ZrO_2(Y)$ , что улучшает параметры РП.

В настоящей работе исследовано влияние ИК излучения на РП в МДП-структуре  $ITO/ZrO_2(Y)/n-Si(001)$  с пирамидальными наноструктурами Ge, выращенными при низкой температуре (500 °С).

## Методика эксперимента

Наноструктуры Ge высотой  $< 10$  нм выращивались методом горячей проволоки [5]. С целью понижения плотности поверхностных состояний на границе  $Ge/ZrO_2(Y)$ , слой Ge легировался Sb из сублимационного источника Ge:Sb. Плёнки  $ZrO_2(Y)$  (12% мол.  $Y_2O_3$ ) осаждались методом высокочастотного магнетронного распыления при 300 °С. Прозрачные электропроводящие верхние электроды ITO наносились методом электронно-лучевого испарения через маску с последующим доокислением на воздухе при 250 °С. Схематическое изображение исследуемой структуры и профиль островка Ge, полученный методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), показаны на рис. 1а.

Циклические вольт-амперные характеристики (ВАХ) МДП-структур измерялись с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A при 300 К. Фотовозбуждение осуществлялось несфокусированным излучением полупроводниковых лазеров с длинами волн  $\lambda = 660$  нм и 472 нм (мощность 1.5 Вт, диаметр луча  $\sim 1$  мм). В качестве источника ИК излучения использовалась лампа накаливания мощностью 20 Вт со светофильтром из пластины Si (КДБ-40), отсекающим излучение с  $h\nu > E_g$ . Излучение лампы фокусировалось линзой в пятно размером  $\sim 1$  см.

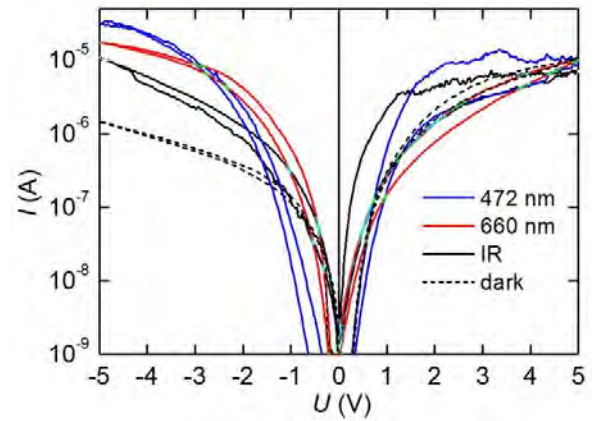


**Рис. 1.** (а) Схематическое изображение МДП-структуры ITO/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Ge/n-Si. На вставке – АСМ профиль островка Ge. (б) Зонная диаграмма (качественно) МДП-структуры ITO/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Ge/n-Si при обратном смещении в темноте (сплошная линия) и при освещении (пунктир)

## Результаты и обсуждение

На циклических ВАХ (рис. 2), измеренных в темноте и при фотовозбуждении, наблюдался гистерезис, связанный с биполярным РП. На темновых ВАХ гистерезис выражен слабо. При освещении излучением видимого и ближнего ИК диапазонов наблюдалось увеличение площади петли гистерезиса (логического коридора РП).

Механизм влияния оптического излучения с  $h\nu > E_g$  на РП не отличается от описанного ранее в [3]. В случае фотовозбуждения ИК излучением с  $h\nu < E_g$ , влияние ИК излучения на РП можно объяснить следующим образом. На рис. 1б качественно показана зонная диаграмма обратного смещённой МДП-структуры с наноструктурами Ge в темноте и при фотовозбуждении с  $h\nu < E_g$ . В этом случае излучение частично поглощается островками Ge (пространственно-непрямые межзонные оптические переходы). Фотовозбуждённые электроны дрейфуют в квазинейтральную область n-Si в поле барьера полупроводник (Si) – диэлектрик (ZrO<sub>2</sub>(Y)). В то же время фотогенерированные дырки остаются локализованными в островках Ge. Образующийся в результате разделения фотовозбуждённых электронно-дырочных пар электрический диполь приводит к возникновению фотоЭДС на барьере Si/ZrO<sub>2</sub>(Y) и, соответственно, к уменьшению ширины области пространственного заряда барьера  $W$ . В свою очередь, это приводит к увеличению напряжённости электрического поля в слое ZrO<sub>2</sub>(Y), что стимулирует электроформинг и РП.



**Рис. 2.** Циклические ВАХ МДП-структуры ITO/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Ge/n-Si в темноте и при фотовозбуждении с различными длинами волн

## Заключение

В настоящей работе продемонстрировано увеличение логического коридора РП в МДП-структурах ITO/ZrO<sub>2</sub>(Y)/n-Si(001) с наноструктурами Ge при фотовозбуждении ИК излучением с энергией кванта, меньшей ширины запрещённой зоны Si. Полученные результаты показывают возможность создания на базе указанных МДП-структур оптически управляемых мемристоров для так называемого коммуникативного диапазона длин волн (1.3 – 1.55 мкм).

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проектной части государственного задания № 0729-2020-0058 и РНФ № 22-22-00866.

## Литература

1. S.H. Lee, X. Zhu, W.D. Lu. // Nano Research, V. 13, 1228 – 1243 (2020).
2. J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang *et al.* // Applied Physics Reviews, V. 7, 011312 (2020).
3. S.V. Tikhov, O.N. Gorshkov, M.N. Koryazhkina *et al.* // Technical Physics Letters, V. 42, 536 – 538 (2016).
4. S.V. Tikhov, V.G. Shengurov, S.A. Denisov *et al.* // Technical Physics, V. 65, 1668 – 1676 (2020).
5. В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов *и др.* // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, № 2(2), 28 – 33 (2013).

# Оптические свойства ван-дер-ваальсовых гомоструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов

Л.В. Котова<sup>1,\*</sup>, М.В. Рахлин<sup>1</sup>, А.И. Галимов<sup>1</sup>, А.В. Пошакинский<sup>1</sup>,  
А.В. Платонов<sup>1</sup>, Т.В. Шубина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт Петербург, Россия.

\*kotova@mail.ioffe.ru

Экспериментально обнаружены ван-дер-ваальсовы гомоструктуры, представляющие собой новый объект, состоящий из объемного кристалла и нескольких обособленных слоев атомарной толщины на его поверхности, полученные при исследовании многослойных пластин, изготовленных методом эксфолиации высококачественных материалов  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$ . Исследована оптика данных гомоструктур, компоненты которых имеют одинаковый химический состав, но разную зонную структуру, определяемую числом монослоев.

## Введение

Атомарно тонкие слои полупроводниковых дихалькогенидов переходных металлов (TMDs) представляют собой новый класс материалов, вызывающих большой интерес, в первую очередь в области физики полупроводников и нанофизике, а также оптоэлектронных приложений. Исследования тонких пленок TMDs находятся на уровне фундаментальных исследований, направленных на выявление их свойств и обнаружение новых эффектов, потенциально имеющих практическое применение. Семейство TMDs (типа  $\text{MX}_2$ ) включает соединения  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$  и  $\text{MoTe}_2$ .

В настоящее время активно исследуются ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, представляющие собой комбинацию различных 2D кристаллов дихалькогенидов переходных металлов и ряда других материалов [1]. Гомоструктуры, выполненные на основе одного и того же материала, были вне фокуса исследователей. В случае традиционных полупроводников они формируются из слоев, которые имеют одинаковую зонную структуру, но различаются уровнем и типом легирования. В отличие от них TMDs дают еще одну возможность: создание гомоструктур из компонентов, содержащих различное число монослоев, поскольку их зонная структура радикально изменяется при переходе от монослоя к объемному материалу [2].

## Методика эксперимента

В работе исследована оптика ван-дер-ваальсовых гомоструктур, состоящих из объемного кристалла и нескольких обособленных слоев атомарной толщи-

ны на его поверхности [3]. Структуры формировались методом отслаивания (эксфолиацией) чешуек из высококачественных кристаллов  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$ .

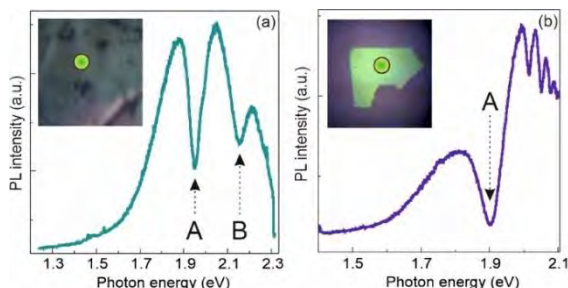
Для исследования свойств ван-дер-ваальсовых гомоструктур использовались оптические методики, а именно спектроскопия микро-фотолюминесценции, поляризационного пропускания, рамановская спектроскопия. Визуализация морфологии и состава гомоструктур осуществлялась методами ПЭМ, СЭМ и АСМ, а также оптической микроскопией.

Структурное качество образцов типично для высококачественных TMDs материалов, что подтверждается микро-рамановскими, ПЭМ, СЭМ, АСМ исследованиями. Результаты таких исследований показывают, что подготовка образцов методом эксфолиации сопровождается частичным отслоением приповерхностных монослоев и образованием дефектов [2]. Для выяснения оптических свойств таких образцов, были использованы методы спектроскопии микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) и микро-отражения при низкой температуре (10 К). Поляризационное пропускания измерялось при комнатной температуре.

## Результаты и обсуждение

Спектроскопия микро-ФЛ показала, что такие гомоструктуры, состоящие из фрагментов с различной зонной структурой, демонстрируют специфические спектры излучения, в которых широкая полоса излучения объемного материала перерезается пиками поглощения сильных экситонных резонансов в слоях атомарных толщин (см. рисунок 1). Обнаружено хорошее совпадение энергий пиков по-

глощения с особенностями в спектрах отражения отдельно взятых монослоев. В WS<sub>2</sub> наблюдались также верхнеэнергетические особенности, возможно, связанные с ридберговской серией экситонных состояний.



**Рис. 1.** Спектры микро-ФЛ (а) MoS<sub>2</sub> и (б) WS<sub>2</sub>, измеренные при 10К. Область возбуждения показана на вставках круглым пятном, диаметр которого порядка 2 мкм. На спектрах положения провалов соответствуют поглощению света экситонами А и В в поверхностных монослоях

Монослои на поверхности пластинки, образовавшиеся при отслаивании, имеют характерный латеральный размер порядка десятков микрон. Границы раздела монослойных участков образованы протяженными дефектами. Исследование оптического пропускания гомоструктур MoS<sub>2</sub> обнаружило поляризационную анизотропию, приводящую к конверсии поляризации. Эффект определяется двумя вкладками: (1) фоновой анизотропией из-за флуктуации направления оси с при наличии линейного двулучепреломления объемного слоистого кристалла MoS<sub>2</sub> [4]; (2) продольно-поперечного расщепления энергий экситонов из-за локализации на линейных структурных дефектах, перерезающих монослои в плоскости. Объемный вклад приводит к 15% преобразованию линейной поляризации в круговую на микрон толщины образца. Экситонный вклад на порядок меньше; однако значителен с учетом монослойных толщин области, где он реализуется. Его угловая зависимость согласуется с направлением линейных структурных дефектов на поверхности образца.

## Заключение

Таким образом, были изготовлены и исследованы ван-дер-ваальсовы гомоструктуры, состоящие из объемного ядра и нескольких обособленных атомарных слоев на его поверхности. Данная архитектура, состоящая из элементов с различной зонной структурой, приводит к специфическому спектру люминесценции: широкая полоса излучения объемного ядра пересекается пиками поглощения сильных экситонных резонансов в поверхностных слоях атомарной толщины.

Исследовано оптическое пропускание таких гомоструктур и выявлено явление поляризационной анизотропии, приводящей к конверсии поляризации.

Формирование дефектов и фрагментация монослойных участков устанавливают естественный предел максимального размера монослоев, которые могут быть получены методом эксфолиации. С другой стороны, уникальность гомоструктур, компоненты которых имеют одинаковый химический состав, но разную зонную структуру, позволит уточнить характеристики экситонных состояний в объемных и 2D кристаллах.

Работа была выполнена при частичной поддержке проекта РФФ №19-12-00273.

## Литература

1. K. Novoselov *et al.* // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 102, 10451, (2005).
2. T. Cheiwchanamangij and W. R. L. Lambrecht // Phys. Rev. B, 85, 205302, (2012)
3. L. V. Kotova *et al.* // Nanoscale, 13, 17566-17575, (2021).
4. B.L. Evans and P.A. Young // Proc. R. Soc. Lond. A, 284, 402–422 (1965).

# Динамика широкоапертурных гетеролазеров со сбоем фазы гофрировки брэгговского резонатора

Е.Р. Кочаровская\*, Н.С. Гинзбург, А.С. Сергеев, А.М. Малкин, В.Ю. Заславский

Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950.

\*catrings@gmail.com, katya@appl.sci-nnov.ru

В рамках метода связанных волн, дополненного квазиоптическим приближением, исследована динамика широкоапертурных гетеролазеров с планарными брэгговскими резонаторами со сбоем фазы гофрировки. В конфигурациях, где ширина брэгговской структуры в несколько раз меньше ширины активной зоны или равна ей, дифракционные поперечные потери обеспечивают селекцию мод по поперечному индексу и одновременно подавляют генерацию на модах, частоты которых расположены выше полосы запрещенной зоны. При этом стабильная одномодовая генерация РОС-гетеролазера обеспечивается положением и значением фазы сбоя гофрировки, которые определяют уровень и отношение мощностей излучения с противоположных торцов РОС-гетеролазера.

## Введение

Периодические структуры (решетки), обеспечивающие распределенную обратную связь (РОС) волн, традиционно используются в гетеролазерах с целью эффективной селекции мод по продольному индексу и обеспечения узкополосной генерации [1]. Однако в случае широкоапертурных лазеров большой мощности с латеральными размерами, достигающими десятков или сотен длин волн, возникает проблема обеспечения стабильной одномодовой генерации, нарушаемой возбуждением мод с различными поперечными индексами. Как было показано в [2-4], дифракционные потери в планарных брэгговских структурах конечной ширины (Рис. 1) позволяют обеспечить селекцию мод по поперечному индексу и подавление генерации продольных мод с частотой выше брэгговской (высококочастотных мод). В данной работе показано, что введение сбоя фазы периодичности позволяет обеспечить высокую селективность при асимметричной генерации с противоположных торцов РОС-гетеролазера.

## Модель

Мы усложнили двумерную краевую задачу [3, 4] введением сбоя фазы решетки:

$$\varphi(z) = \begin{cases} 0, & 0 < z < z_0 \\ \phi, & z_0 \leq z \leq l_z \end{cases}$$

на произвольную величину  $\phi$ . В результате коэффициент связи встречных волн  $\beta(z) = |\beta| e^{i\varphi(z)}$  [2-4] может менять фазу скачком в сечении  $z_0$ , что часто используется в гетеролазерах [5]. В рамках пространственно-временного подхода [3, 4] связь и

взаимное рассеяние встречных волновых потоков в периодической структуре с учетом поперечной дифракции излучения описывается уравнениями параболического типа с правой частью, определяемой активной средой. В предположении достаточно малых времен релаксации для описания активной среды с однородным уширением спектральной линии использовались уравнения Блоха [3, 4], учитывающие динамику встречных волн поляризации среды, инверсии разности населенностей уровней и ее решетки под действием постоянной накачки, создающей уровень инверсии  $n_p$ . Моделирование проводилось для параметров активной среды близких к реализованным квантово-каскадным лазерам со значительными латеральными размерами [6].

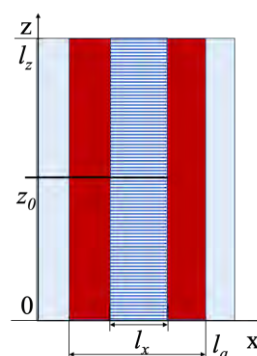


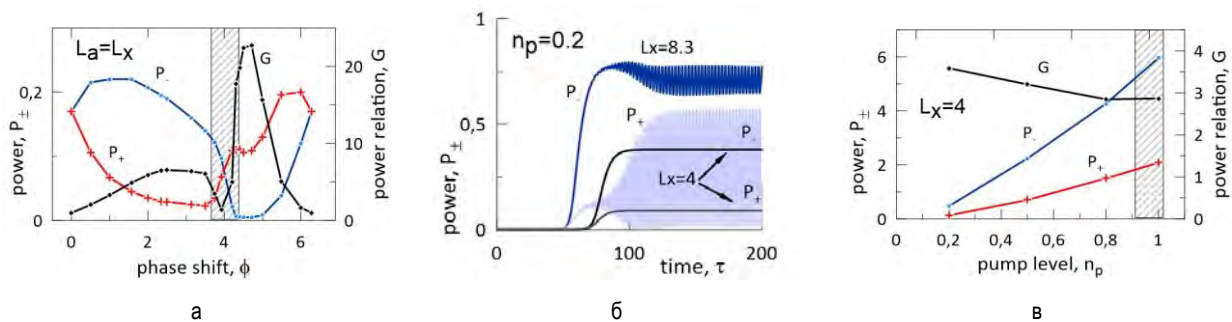
Рис. 1. Схема РОС-гетеролазера. Внутри диэлектрической пластины размещена активная среда длиной  $l_z$  и шириной  $l_a$ , над которой нанесена периодическая гофрировка шириной  $l_x$ , имеющая в сечении  $z_0$  сбой фазы на величину  $\phi$

## Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены на Рис. 2 для заданных нормированных размеров активной среды: ширины  $L_a=8.3$  и длины  $L_z=5.3$ , различных



уровней накачки и двух значениях ширины брэгговской структуры:  $L_x=8.3$  и  $L_x=4$ . Анализировались условия реализации одно- и многомодового режимов генерации в зависимости от латеральных размеров гофрировки, положения и величины сбоя фазы решетки и уровня постоянной накачки. Для гетеролазера с размерами активной среды, соответствующим числу Френеля  $N=1$ , было найдено оптимальное положение дефекта  $z_0=4$ , при котором отношение мощностей излучения с противоположных торцов  $G$  увеличивается до 20 и более раз, т. е. реализуется практически однонаправленный вывод



**Рис. 2.** а) Мощности генерации с левого ( $P_-$ , синяя линия) и правого ( $P_+$ , красная линия) торцов РОС-гетеролазера с накачкой на уровне  $n_p=0.1$  при совпадающих латеральных размерах активной среды и брэгговской решетки  $L_a=L_x=8.3$  в зависимости от величины сбоя фазы гофрировки  $\phi$ . Черной линией показано отношение мощностей  $G$ . б) Установление режимов многомодовой ( $L_x=8.3$ ) и одномодовой ( $L_x=4$ ) при  $n_p=0.2$  и  $\phi=\pi$ . в) Мощности генерации с левого  $P_-$  и правого  $P_+$  торцов лазера с шириной брэгговской структуры  $L_x=4$  и  $\phi=\pi/2$  в зависимости от уровня накачки. Заштрихованные области – зоны многомодовой генерации. Активная среда имеет продольный размер  $L_z=5.3$ , скорости релаксации поляризации  $\Gamma_2=5.1$  и инверсии  $\Gamma_1=1$ , сбоя гофрировки расположен в сечении  $z_0=4$

Для определенных значений фазы сбоя гофрировки можно повысить мощность стационарной генерации практически в десять раз (Рис. 2 в,  $\phi=\pi/2$ ). Заметим, что в зависимости от величины  $\phi$  многомодовая генерация возникает при различных уровнях накачки, так если  $\phi=\pi/2$ , то  $n_p=0.9$ , а, например, для  $\phi=\pi$  это значение около 0.5.

Таким образом на основе моделирования показано, что в гетероструктурах с брэгговскими резонаторами планарной геометрии при относительно небольших значениях параметра Френеля наличие сбоя фазы решетки стабилизирует одномодовую генерацию в широкой области параметров и позволяет обеспечить многократное отличие мощностей излучения с противоположных торцов активной среды.

излучения (Рис. 2 а), однако при относительно небольших превышения над порогом  $n_p=0.1$ .

Увеличить мощность накачки (и, соответственно, уровень выходной мощности), при которой сохраняется устойчивый режим одномодовой генерации позволяет уменьшение латеральных размеров брэгговской структуры [4]. Как видно из Рис. 2 б, при фиксированных значениях ширины активной зоны  $L_x=8.3$  и уровня накачки  $n_p=0.2$  уменьшении ширины гофрировки до  $L_x=4$  приводит к установлению одномодового режима генерации.

Работа поддержана в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме № 0030-2021-0001.

## Литература

1. A. Yariv, Quantum Electronics. - Wiley, 1989.
2. N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, E.R. Kocharovskaya et al. // Physics Letters A. V. 384, 126219 (2020).
3. Н.С. Гинзбург, А.С. Сергеев, Е.Р. Кочаровская и др. // ФТП. Т. 54, 974 (2020).
4. Н.С. Гинзбург, А.С. Сергеев, Е.Р. Кочаровская и др. // ФТП. Т. 55, 659 (2021).
5. S. Akiba, Encyclopedic Handbook of Integrated Optics. CRC Press-Taylor & Francis Group. 2005.
6. T.S. Mansuripur, C. Vernet, P. Chevalier et al. // Phys. Rev. A. V. 94, 063807 (2016).

# Поляритонные резонансы в автомодуляции сверхизлучающих лазеров

Е.Р. Кочаровская<sup>1, §</sup>, А.В. Мишин<sup>1</sup>, В.В. Кочаровский<sup>1, 2</sup>, Вл.В. Кочаровский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, д. 46, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

§ katya@appl.sci-nnov.ru

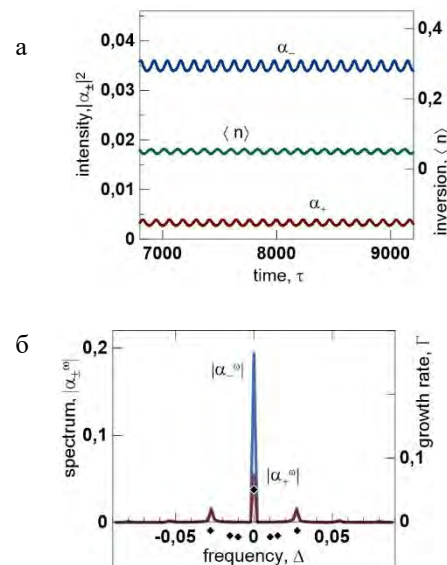
На основе численного решения полуклассических уравнений Максвелла-Блоха в одномерной модели двухуровневого сверхизлучающего лазера с низкодобротным симметричным резонатором Фабри-Перо проведен сравнительный анализ спектра поляритонных мод линеаризованной задачи и дискретного спектра нелинейного режима квазимонохроматической генерации со слабой автомодуляцией и сильным спонтанным нарушением зеркальной симметрии полей встречных волн, инверсии населённостей и поляризации активной среды. Показано, что частоты резонансной автомодуляции установившегося асимметричного сверхизлучательного фазового состояния близки к частотам поляритонных мод, рассчитанным по среднему уровню установившейся инверсии населённостей и обладающих небольшими декрементами.

В обычных лазерах с симметричными высокодобротными резонаторами Фабри-Перо, где время жизни фотонов велико по сравнению с временем жизни поляризации (оптических дипольных колебаний) активной среды, одномодовой генерации даже при наличии значительной автомодуляции отвечает симметричное распределение поля. В сверхизлучающих лазерах, где время жизни фотонов в резонаторе много меньше времен релаксации активной среды  $T_{1,2}$ , при небольших превышениях порога генерации из каждого торца выходит в среднем одна и та же квазихаотическая последовательность импульсов коллективного спонтанного излучения, имеющих одинаковые непрерывные спектры [1-4].

Однако, как показано в работах [1, 2], существует достаточно широкая область значений параметров симметричного резонатора, активной среды и накачки, при которых импульсы сверхизлучения на переходном этапе к установившейся генерации создают сильную локальную неоднородность инверсии населённостей и её решётки в форме пика, смещённого из центра к одному из торцов образца. На ней возникают дополнительные отражение и усиление встречных волн, биения которых согласованы с неоднородной решёткой инверсии населённостей.

В результате спонтанно устанавливается режим с нарушенной зеркальной симметрией полей и возбуждений активной среды, так что интенсивности излучения из противоположных торцов сильно отличаются (верхняя и нижняя кривые на Рис. 1 а). Как правило, в таком режиме средняя по резонатору инверсия населённостей (средняя кривая на

Рис. 1 а) и излучаемые поля подвержены автомодуляции на одной или нескольких частотах (Рис. 1 б). В настоящей работе найдено, что последние близки к частотам поляритонных мод лазера, рассчитанным по среднему уровню установившейся инверсии населённостей и обладающих небольшими декрементами.



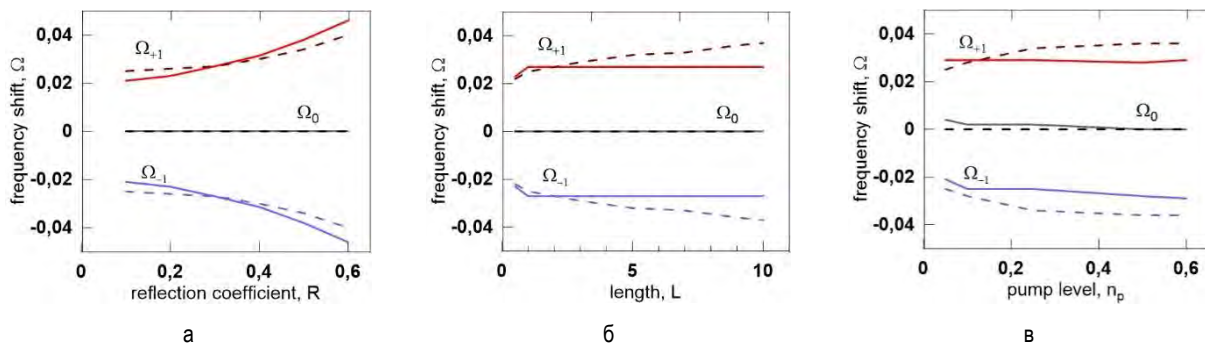
**Рис. 1.** Установившаяся асимметричная квазимонохроматическая генерация сверхизлучающего лазера с симметричным резонатором Фабри-Перо. а) Осциллограммы интенсивностей полей  $|\alpha_{\pm}|^2$  на противоположных торцах и усредненной по образцу инверсии населённостей  $\langle n \rangle$ ; б) амплитудные спектры  $|\alpha_{\pm}|^2$  полей. Точками показаны инкременты/декремента поляритонных мод, вычисленные при однородной инверсии населённостей  $n=0.05$ , равной её среднему установившемуся значению  $\langle n \rangle_{\tau}$ . В обозначениях [1] лазер имеет длину  $L=2$ , коэффициент отражения зеркал  $R=0.3$ , уровень накачки  $n_p=1$ , скорости релаксации поляризации  $\Gamma_2=0.02$  и инверсии населённостей  $\Gamma_1=0.01$

Рассчитанный спектр поляритонных мод в интересующем нас случае слабого неоднородного уширения спектральной линии с инверсией населённостей уровней активных центров отличается не только от спектра электромагнитных мод обычных лазеров с резонаторами Фабри-Перо, но и от так называемого поляритонного спектра в полупроводниковых лазерных гетероструктурах, например экситонных [5].

На основе численного решения как нелинейных, так и линеаризованных уравнений Максвелла-Блоха [1-4] было осуществлено детальное сравнение дискретного спектра указанной слабой автомодуляции (сплошные линии на Рис. 1 б) и спектра поляритонных мод (чёрные точки на Рис. 1 б) сверхизлучающего лазера с резонатором Фабри-Перо. Показано также, что нелинейные сдвиги частот этих мод и особенности возбуждения найденных поляритонных резонансов могут быть связаны с колебаниями Раби активных центров (с оптическим дипольным моментом  $d$ ) на частотах  $\omega_R = dE / \hbar$ , определяемых значениям амплитуды электромагнитного поля  $E$  в окрестности пика решётки инвер-

сии населённостей. Величина таких частот Раби в типичных расчётах оказывалась немного меньше частот как автоколебаний лазера, так и его поляритонных мод.

В целом было установлено, что для квазимонохроматического асимметричного сверхизлучательного фазового состояния, т.е. при не слишком сильной автомодуляции, её спектр (см. пример на Рис. 1 б) обязан нелинейному возбуждению одной или нескольких поляритонных мод с наименьшими декрементами. Их собственная генерация, несмотря на большое превышение уровня накачки над порогом лазерной генерации, подавлена вследствие истощения инверсии населённостей центральной сверхизлучательной модой, тогда как созданная последней решётка инверсии населённостей слабо влияет на рассмотренные поляритонные моды. Сделанный вывод подтверждают приведенные на Рис. 2 зависимости частот центральной  $\Omega_0$  и двух соседних мод  $\Omega_{\pm 1}$  от коэффициента отражения зеркал, длины резонатора и уровня накачки в режиме слабой автомодуляции.



**Рис. 2.** Сравнение результатов расчетов – с использованием нелинейных (сплошная линия) и линеаризованных (штриховая линия) уравнений Максвелла-Блоха – для сдвига частоты центральной  $\Omega_0$  и двух соседних  $\Omega_{\pm 1}$  поляритонных мод сверхизлучающего лазера в зависимости от а) коэффициента отражения зеркал  $R$  для  $L=2$ ,  $n_p=1$ ; б) длины резонатора  $L$  для  $R=0.3$ ,  $n_p=1$ ; в) уровня накачки  $n_p$  для  $L=12$ ,  $R=0.3$ . Активная среда имеет такие же параметры, как на Рис.1, в частности,  $\Gamma_2=0.02$  и  $\Gamma_1=0.01$

Таким образом, проведённое моделирование и качественный анализ свидетельствуют о том, что поляритонные резонансы играют существенную роль в динамике асимметричного диссипативного фазо-

вого состояния ансамбля активных центров и когерентного поля в сверхизлучающем лазере.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН № 0030-2021-0002.

## Литература

1. Вл.В. Кочаровский, В.В. Железняков, Е.Р. Кочаровская и др. // УФН, Т. 187, 367 (2017).
2. Вл.В. Кочаровский, В.А. Кукушкин, С.В. Тарасов и др. // ФТП, Т. 219, 1321 (2019).
3. V.I.V. Kocharovskiy, A.A. Belyanin, E.R. Kocharovskaya, V.V. Kocharovskiy, *Superradiant*
4. В.В. Железняков, Вл.В. Кочаровский, В.В. Кочаровский // УФН, Т. 159, 193 (1989).
5. A. Kavokin, G. Malpuech. *Cavity Polaritons*, vol. 32. (Academic Press, 2003).

# Диссипативный сверхизлучательный фазовый переход в системе активных центров с некогерентной непрерывной накачкой в низкодобротном резонаторе Фабри-Перо

Вл.В. Кочаровский<sup>1,§</sup>, Е.Р. Кочаровская<sup>1</sup>, А.В. Мишин<sup>1</sup>, В.В. Кочаровский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, д. 46, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

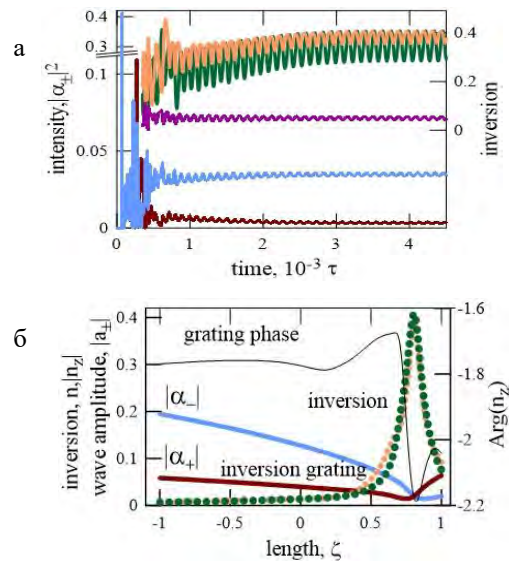
<sup>§</sup> kochar@appl.sci-nnov.ru

Исследован предсказанный нами диссипативный (неравновесный) сверхизлучательный фазовый переход, имеющий место уже в простейшей одномерной модели достаточно плотного протяжённого ансамбля двухуровневых активных центров (атомов или экситонов), которые находятся в низкодобротном резонаторе Фабри-Перо под действием непрерывной нерезонансной накачки. Переход обусловлен когерентной динамикой поляризации и инверсии населённостей уровней активных центров и связан с образованием локализованного брэгговского зеркала внутри резонатора за счёт самосогласованной решётки инверсии населённостей, сформированной двумя встречными импульсами сверхизлучения. Даже в случае симметричного резонатора это зеркало формируется, как правило, не в его центре, а вблизи одного из торцов, спонтанно нарушая зеркальную симметрию устанавливающегося состояния поля и активной среды и приводя к многократному отличию интенсивностей когерентного излучения из противоположных торцов.

Доклад посвящён качественному анализу предсказанного нами неравновесного сверхизлучательного фазового перехода, который исследуется в простейшей одномерной модели достаточно плотного протяжённого ансамбля двухуровневых активных центров (атомов или экситонов), находящихся в низкодобротном резонаторе Фабри-Перо под действием непрерывной нерезонансной накачки [1, 2].

Образующееся диссипативное фазовое состояние является когерентной суперпозицией встречных неоднородных волн электромагнитного поля и поляризации активных центров и существует благодаря локализованному брэгговскому зеркалу, сформированному внутри резонатора самосогласованной решёткой их инверсии населённостей (Рис. 1).

В широкой области параметров указанное брэгговское зеркало обладает устойчивой структурой и кардинально меняет характер согласованных полей встречных волн электромагнитного поля, поляризации и инверсии населённостей среды активных центров. Оно исключает хаотическое возникновение импульсов инициированного коллективного спонтанного излучения и в общем случае является автомодуляционным, но может быть и стационарным несмотря на большое превышение порога генерации.



**Рис. 1.** (а) Переходный процесс: осциллограммы (кривые перечислены снизу вверх) интенсивности полей  $|\alpha_{\pm}|^2$  на противоположных торцах, усредненной по образцу инверсии населённостей  $\langle n \rangle$ , максимальных значений инверсии  $n_m$  и её решётки  $n_g$ . (б) Пространственные профили инверсии населённостей  $n$ , её решётки  $|n_z|$  и фазы  $\text{Arg}(n_z)$ , амплитуд встречных волн  $|\alpha_{\pm}|$  в установившемся режиме. В безразмерных обозначениях [1] сверхизлучающий лазер имеет длину  $L=2$ , коэффициенты отражения зеркал  $R=0.3$ , уровень накачки  $n_p=1$ , скорости релаксации поляризации  $\Gamma_2=0.02$  и инверсии населённостей  $\Gamma_1=0.01$  активных центров и полуширину их неоднородной спектральной линии  $\Delta_0=0.005$



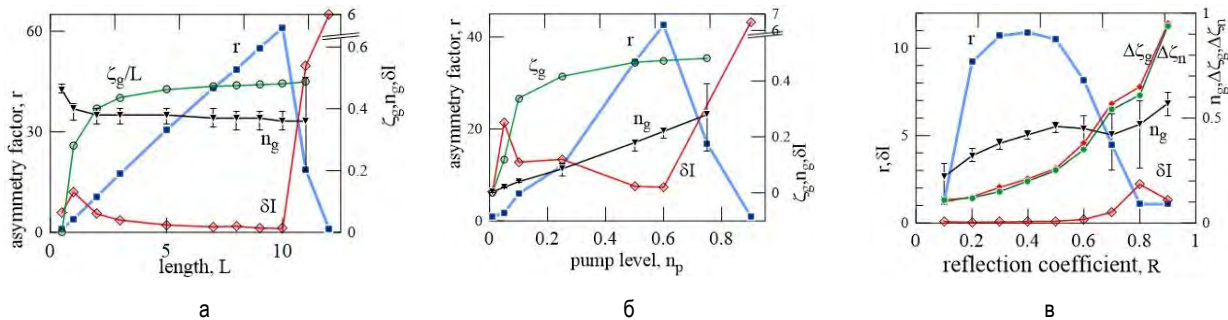
Как правило, даже в симметричном резонаторе это зеркало оказывается расположенным не в его центре, а вблизи одного из торцов, т.е. зеркальная симметрия устанавливающегося состояния спонтанно нарушается и интенсивности излучения из противоположных торцов сильно отличаются.

На основе детального численного и аналитического исследования нелинейных решений уравнений Максвелла-Блоха выяснены основные свойства образующегося нового состояния многочастичной системы с радиационным взаимодействием активных центров. Типичные примеры и характеристики диссипативного (неравновесного) сверхизлучательного фазового состояния проиллюстрированы на Рис. 1 и 2 для нормированных амплитуд полей встречных волн и инверсии населённостей активных центров с практически однородным уширением спектральной линии (пространственные, временные и частотные переменные обезразмерены согласно [1]). На рисунках, в частности, представлены коэффициенты асимметрии  $r = \max[|\alpha_{\pm}|^2 / |\alpha_{\mp}|^2]$  и относительной модуляции

$\delta_I = \Delta|\alpha_{\pm}|^2 / |\alpha_{\pm}|^2$  для более сильной из двух встречных волн электромагнитного поля.

Обсуждаются возможности экспериментальной реализации и управления уникальными когерентными состояниями электромагнитного поля и ансамбля атомов или экситонов, а также спектрально-динамическими характеристиками их излучения, которые значительно отличаются от типичных для стандартных лазеров с высокодобротными резонаторами.

Проведено сравнение с равновесным сверхизлучательным фазовым переходом Дике, изучаемым в течение полувека и ещё не реализованным экспериментально. Указаны также теоретические и экспериментальные достижения в исследовании подобных неравновесных фазовых переходов, которые происходят при наложении внешнего резонансного (когерентного) оптического поля на распределённый ансамбль, имеющий размеры больше или порядка длины волны используемого излучения и находящийся в достаточно высокодобротном резонаторе.



**Рис. 2.** Зависимости коэффициента асимметрии  $r$  и относительной модуляции  $\delta_I$  для более сильной из двух встречных волн поля излучения, максимальной амплитуды пика решётки инверсии населённостей  $n_g$ , усредненной по времени, а также её максимальных и минимальных значений от а) длины резонатора  $L$  для  $R=0.3, n_p=1$ ; б) уровня накачки  $n_p$  для  $L=12, R=0.3$ ; в) коэффициента отражения зеркал  $R$  для  $L=2, n_p=1$ . Дополнительно приведены на (а) зависимость относительного положения амплитуды пика решётки инверсии населённостей  $\zeta_g/L$ ; (б) зависимость положения амплитуды пика решётки инверсии населённостей  $\zeta_g$ ; (в) зависимости ширины пиков инверсии населённостей  $\Delta\zeta_n$  и её решётки  $\Delta\zeta_g$ . Релаксационные параметры те же, что на Рис. 1

Представленные результаты доказывают возможность существования и устанавливают характерные свойства неравновесных фазовых состояний распределённого ансамбля активных центров, находящихся в том или ином резонаторе в отсутствие внешнего резонансного поля, но подверженных действию некогерентной накачки и взаимосвязанных когерентным полем их собственного излучения. При изменении параметров накачки, резонатора или атомного/экситонного ансамбля в опреде-

лённой области значений могут происходить разнообразные сверхизлучательные фазовые переходы, которые кардинально отличаются от переходов между различными режимами генерации обычных лазеров.

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

**Литература**

1. Вл.В. Кочаровский, В.В. Железняков, Е.Р. Кочаровская и др. // УФН, Т. 187, 367 (2017).
2. Вл.В. Кочаровский, В.А. Кукушкин, С.В. Тарасов и др. // ФТП, Т. 219, 1321 (2019).



# Синтез CVD-алмаза детекторного качества для спектрометрии ионизирующих излучений

А.В. Красильников<sup>1</sup>, Н.Б. Родионов<sup>1</sup>, А.П. Большаков<sup>2</sup>, В.Г. Ральченко<sup>2</sup>, С.К. Вартапетов<sup>3</sup>, Ю.Е. Сизов<sup>3</sup>, С.А. Мещанинов<sup>1</sup>, А.Г. Трапезников<sup>1</sup>, В.П. Родионова<sup>1</sup>, В.Н. Амосов<sup>1</sup>, Р.А. Хмельницкий<sup>1</sup>, А.Н. Кириченко<sup>1</sup>

1 Проектный центр ИТЭР ГК Росатом, пл. академика Курчатова 1, строение 3 Москва, 123182.

2 Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991.

3 ООО «Оптосистемы», Калужское ш., д.4/1, Троицк, Москва, 108841.

a.krasilnikov@iterf.ru

Методом осаждения из газовой фазы в смесях метан-водород на усовершенствованном СВЧ плазменном реакторе ARDIS 300 с СВЧ плазмой на усовершенствованном СВЧ плазменном реакторе ARDIS 300 в «Проектном центре ИТЭР» получены эпитаксиальные алмазные пленки высокого качества на легированных бором монокристаллических подложках алмаза. Структурное и примесное совершенство пленок охарактеризовано с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света, фотолюминесценции и оптического поглощения. На пленках толщиной 70 – 80 мкм, выращенных на подложках с проводимостью  $p$ -типа и концентрацией бора ~100 ppm, служащих контактом, созданы прототипы радиационных детекторов, измерены их чувствительность и амплитудные спектры в потоках альфа-частиц и нейтронов с энергией 5.5MeV и 14.7 MeV, соответственно. Показано, что при облучении альфа-частицами и нейтронами эффективность сбора заряда в синтезированном алмазе при приложенном поле ~4 V/μm достигает 94% и 91%, соответственно.

## Введение

Уникальные электрофизические свойства алмаза обеспечивают возможность создания радиационно-стойких детекторов ионизирующих излучений и других высокозагруженных модулей алмазной электроники для применения в физике высоких энергий, в ряде отраслей, использующих ядерные технологии, в исследованиях термоядерной плазмы. В конструкции детектора алмаз является твердотельной ионизационной камерой со сбором зарядов на электродах, располагаемых на двух сторонах алмазной пластины. Определяемый ядерными реакциями в алмазе амплитудный спектр алмазного детектора в потоке быстрых нейтронов, рожденных при синтезе дейтерия и трития, обеспечил эффективное применение алмазных детекторов для спектрометрии ДТ нейтронов в термоядерных исследованиях на TFTR [1], JT-60U, JET и на ряде других установок с ядерными технологиями.

Наиболее существенных успехов в синтезе алмазов с практически полным сбором зарядов (Charge Collection Efficiency – CCE) при облучении альфа-частицами с энергией ~ 5.5 МэВ в последние 20 лет достигли в компании «ElementSix» (CCE = 95-100%, энергетическое разрешение  $\Delta E/E = 0.4 - 1.2\%$  при толщине пластин  $\Delta = 100 - 500$  мкм [2]), Римском университете “TorVergata” (CCE ~ 100% и

$\Delta E/E = 1.1\%$ ,  $\Delta = 110$  мкм), в компании «PaTechnology», Сингапур (CCE ~ 100% и  $\Delta E/E = 0.8\%$ ,  $\Delta = 890$  мкм), в Университете Хоккайдо и AIST, Япония (CCE ~ 100% и  $\Delta E/E = 0.38\%$ ,  $\Delta = 70 - 150$  мкм).

## CVD-синтез алмазных плёнок

Выращивание монокристаллических нелегированных алмазных пленок проводилось в специально модернизированном для синтеза алмаза детекторного качества СВЧ-плазменном реакторе ARDIS-300 (частота 2,45 ГГц, мощность до 6 кВт) производства ООО "Оптосистемы". Предельно достижимый вакуум в реакторе составляет  $5 \times 10^{-7}$  Торр. Уровень натекания из атмосферы в реактор не превышал  $2.5 \times 10^{-6}$  Торр×л/сек, что в CVD процессе обеспечивает концентрацию азота в эпитаксиальном материале на уровне 20 ppb (вклад в концентрацию азота в алмазе от примеси в рабочем газе на 2 порядка меньше, ~0.1 ppb). В качестве подложек для эпитаксии использовались проводящие легированные бором пластины алмаза, синтезированные методом High Pressure-High Temperature – (HPHT), с концентрацией бора  $\approx 100$  ppm. Полированные подложки имели размеры  $4.5 \times 4.5 \times 0.5$  мм<sup>3</sup> и ориентацию ростовых граней (100). Процесс роста проводили при условиях: давление  $p = 170$  Торр, концентрация метана в газе  $[CH_4] = 4\%$ , температура

подложки  $T_s = 940^\circ\text{C}$ , СВЧ мощность  $P_{\text{MW}} = 5500$  Вт, время осаждения  $t_g = 24$  часа, скорость роста  $GR = 3 - 4$  мкм/час, толщины пленок  $d = 70-80$  мкм.

Фазовую чистоту пленок и наличие оптически активных дефектов в образцах исследовали с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и фотолуминесценции (ФЛ). Величина полной ширины на полувысоте КР спектров составила 2.2, 2.4, 2.7 и 2.3  $\text{cm}^{-1}$  для синтезированных пленок B21, B22, B23 и H03, соответственно. На прозрачном образце H03 (подложка Па) было измерено оптическое поглощение до и после эпитаксии в диапазоне длин волн 230-350 нм. С учётом чувствительности измерений и других ошибок можно утверждать, что концентрация  $N_s^0$  в эпитаксиальной плёнке H03 толщиной  $51 \pm 11$  мкм и синтезированных при близких условиях плёнках B21-B23 по крайней мере не превышает 50 ppb.

## Эффективность сбора заряда в пленках

Для измерения эффективности сбора зарядов (электронов и дырок), рождаемых в алмазе частицами высоких энергий, на ростовую сторону пленки и свободную сторону проводящей подложки магнетронным напылением при температуре образца  $250^\circ\text{C}$  были нанесены сплошные металлические контакты из платины толщиной 35 нм.

Измерение амплитудных спектров детектора было проведено при облучении альфа-частицами от образцового источника  $^{241}\text{Am}$  энергией  $\sim 5.5$  МэВ и активностью  $\sim 30$  кБк, при атмосферном давлении и в вакууме и расположении детектора на расстоянии  $\sim 2$  мм от источника, и нейтронами на генераторе ИНГ-07Т ( $E_n = 14,7$  МэВ). Измеренные амплитудные спектры сравнивались со спектрами образцового алмазного детектора Eg13 (изготовитель «Проектный центр ИТЭР» из CVD-алмаза компании «Element Six»), у которого эффективность сбора заряда составляла  $\sim 98\%$ , а энергетическое разрешение  $\Delta E/E \sim 0.8\%$ .

При измерениях на альфа-источнике при атмосферном давлении энергетические разрешения плёнок B21-B23 составили 1.7%, 2.45% и 2.5%, соответственно. Эффективности сбора заряда в плёнках B21, B22 и B23 составили 92%, 86% и 86%, соответственно, при погрешности измерений  $\pm 0.2\%$ .

Следует отметить стабильность формы амплитудного спектра: так, в серии из 5 последовательных интервалов длительностью 300 секунд каждый для B23 спектры были практически идентичными, что указывает на относительно низкий уровень концентрации центров захвата заряда в плёнках.

Образец B21 был также исследован в спектре альфа-частиц  $^{241}\text{Am}$  источника в вакууме. Зарегистрированные амплитудные спектры B21 (представлены на рис. 1.) продемонстрировали ССЭ  $\sim 94\%$  и энергетическое разрешение 88 кэВ (1.69%).

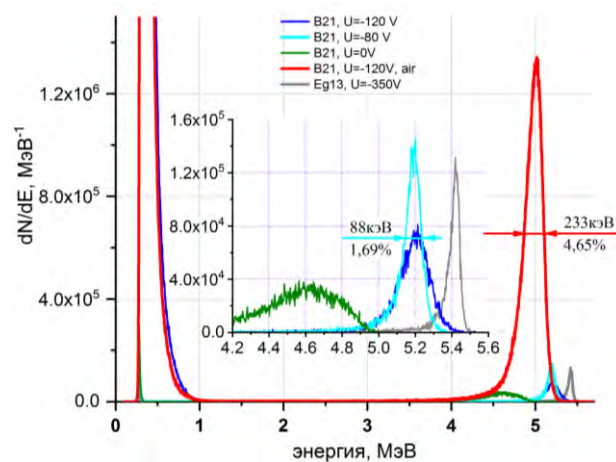


Рис. 1. Амплитудные спектры детектора с плёнкой B21 в потоке альфа-частиц  $^{241}\text{Am}$  в вакууме (синий, голубой, зелёный) и на воздухе (красный) в сравнении с Eg13 в вакууме (серый)

Для оценки снизу эффективности сбора зарядов при равномерной генерации электрон-дырочных пар во всём объёме синтезированных алмазных плёнок были зарегистрированы амплитудные спектры детекторов с плёнками B21, B22 и B23 в потоках нейтронов с энергией 14.7 МэВ и полной шириной на половине высоты энергетического распределения  $\sim 320$  keV. Эффективности сбора зарядов в B21, B22 и B23 при облучении ДТ нейтронами составили 91%, 85% и 85%, соответственно.

## Литература

1. A.V. Krasilnikov, E.A. Azizov, A.L. Roquemore, V.S. Khrunov, K.M. Young. Review of Scientific Instruments, **68** (1), 553-556 (1997).
2. Z. Minglong, X.Yiben, W. Linjun, S. Hujiang, and G. Beibei. Solid State Commun., **130**, 551 (2004).

# Нестандартные особенности взаимодействия одиночных люминесцентных центров, сформированных ядрами частичных дислокаций в CdTe и ZnSe, с продольными оптическими фононами

В.С. Кривобок, С.Н. Николаев, В.С. Багаев, Е.Е. Онищенко, С.И. Ченцов\*,  
А.А. Пручкина

Физический институт им П. Н. Лебедева РАН, Ленинский пр-т, 53, Москва, 119991.

\*semtch@gmail.com

С помощью измерений низкотемпературной (5 К) микрофотолюминесценции исследованы отдельные люминесцентные центры, формируемые ядрами частичных дислокаций в пленке CdTe/Si и квантовой яме на основе ZnSe. Показано, что для данных центров относительные интенсивности фоновых повторений, вызванные взаимодействием излучающего состояния с продольными оптическими (LO) фононами, могут на порядок отличаться от величин, предсказываемых известной формулой Хуанга-Рис. Обнаруженная перестройка интенсивности фоновых повторений приписана изменению кривизны адиабатических потенциалов (дефект частоты), которое возможно за счет неустойчивости структуры связей в дислокационном ядре по отношению к состоянию электронной подсистемы.

## Введение

Хорошо известно, что в полярных полупроводниках сильное взаимодействие электронной подсистемы люминесцентных центров с продольными оптическими (LO) фононами приводит к появлению в спектрах излучения (поглощения) эквидистантных полос, относительная интенсивность которых описывается формулой, впервые полученной Хуангом и Рис [1]:

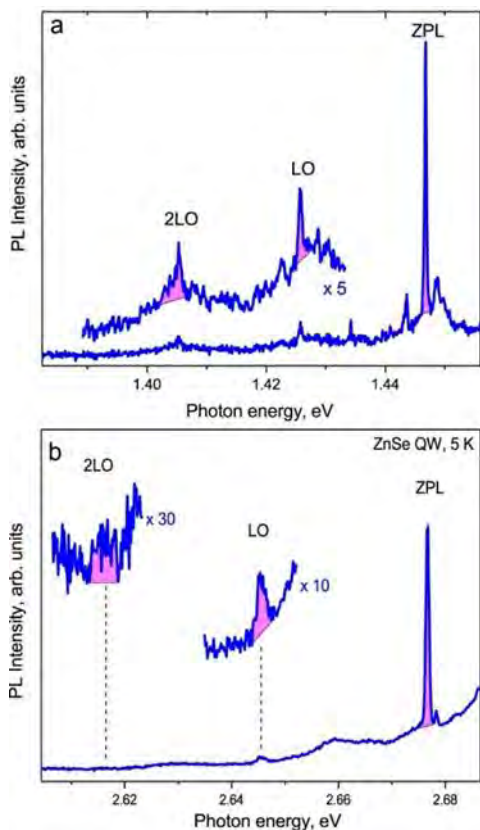
$$I_n = \exp(-s) \cdot s^n / n! \quad (1)$$

где  $n$  – номер фононного повторения,  $s$  – фактор Хуанга-Рис. Формула (1) подразумевает неизменность кривизны адиабатического потенциала при электронном переходе. В то же время, по крайней мере, для некоторых люминесцентных центров, электронный переход может сопровождаться изменением кривизны адиабатических потенциалов, связанным с чувствительностью структуры/жесткости связей к состоянию электронной подсистемы [2]. В данной работе показано, что подобная ситуация реализуется и для люминесцентных центров, формируемых ядрами частичных дислокаций в пленках CdTe/Si и квантовых ямах на основе ZnSe.

## Дислокационная микрофотолюминесценция в CdTe и ZnSe

На рис. 1а приведён типичный спектр низкотемпературной (5 К) МФЛ для области дислокационного излучения пленки CdTe/Si. Описание образцов и процедуры измерений приведены [3]. В спектре МФЛ видна узкая бесфононная линия (ZPL, 1.447 эВ), соответствующая коротковолновому хвосту  $\Upsilon$  линии. Данная линия, быстро гаснущая с температурой, представляет собой люминесценцию одиночного центра, сформированного ядром частичной дислокации. Также регистрируются фононные повторения, соответствующие возбуждению одного (LO, 1.426 эВ) и двух (2LO, 1.405 эВ) оптических фононов. Энергетические сдвиги между линиями воспроизводят энергию LO фонона CdTe, соответствующего центру зоны Бриллюэна (21 мэВ). Значение  $S$  для одиночного люминесцентного центра, рассчитанное как соотношение соответствующих площадей (см. рис. 1а), составило  $0.072 \pm 0.007$ . В свою очередь, согласно модели Хуанга-Рис, это означает, что соотношение интегральных интенсивностей между вторым и первым фононным повторением должно быть  $S/2 = 0.036 \pm 0.004$ . В то же время, соотношение интенсивностей, измеренное

экспериментально, составляет  $0.72 \pm 0.07$  и, таким образом, более чем на порядок превышает значение, ожидаемое из (1).



**Рис. 1.** а). Пример отдельного люминесцентного центра, сформированного частичной дислокацией в пленке CdTe/Si. б). Пример отдельного люминесцентного центра, сформированного дислокацией в квантовой яме (QW) на основе ZnSe. ZPL – обозначает бесфононную линию. Температура 5 K

Качественно аналогичная ситуация наблюдается и в случае дислокационной МФЛ ZnSe при температуре 5 K. На рис. 1b приведен типичный спектр излучения отдельной (частичной) дислокации, пересекающей ZnSe квантовую яму, размещенную внутри ZnMgSSe барьеров. В спектре доминирует интенсивная бесфононная линия, соответствующая одиночному люминесцентному центру (ZPL, 2.677 эВ), а также фононные LO- (2.645 эВ) и 2 LO- (2.616 эВ) повторения. Энергетический сдвиг между линиями  $\sim 31$  мэВ типичен для LO фононов в ZnSe с квазиимпульсом вблизи центра зоны Бриллюэна. При сравнении интегральных интенсивностей фононных повторений оказывается, что значение  $S$ , рассчитанное как соотношение площади ZPL линии к площади LO линии составляет  $0.061 \pm 0.002$ . В свою очередь, согласно модели Хуанга-Рис, это означает, что соотношение интенсивностей между

вторым и первым фононным повторением должно быть  $S/2 = 0.031 \pm 0.001$ . В то же время, соотношение интенсивностей, измеренное экспериментально, составляет  $0.58 \pm 0.05$ , что на порядок превышает значение, ожидаемое из (1).

Исходя из доступных ab-initio расчетов следует, что в CdTe реконструкция связей в ядре частичной дислокации зависит от состояния электронной подсистемы. Поскольку состояние электронной подсистемы меняется в процессе перехода, следует ожидать, что переход в дислокационном ядре сопровождается частичной перестройкой оборванных связей и, следовательно, напряжений в ближайшей окрестности дислокации. В этом случае, адиабатические потенциалы должны иметь разную кривизну, а интенсивность LO-фононных повторений – демонстрировать качественное отклонение от (1). Аналогичные рассуждения позволяют объяснить нестандартное распределение интенсивностей фононных повторений для дислокационной люминесценции ZnSe.

## Заключение

Таким образом, при гелиевых температурах получены спектры излучения отдельных люминесцентных центров, сформированных ядрами частичных дислокаций в CdTe и ZnSe. Показано, что для люминесцентных центров, сформированных дислокациями, распределение интенсивности между бесфононным переходом и повторениями с участием продольных оптических фононов не описывается формулой Хуанга-Рис. Обнаруженное увеличение относительной интенсивности 2LO фононного повторения приписано изменению кривизны адиабатических потенциалов (дефекту частоты), которое возможно за счет неустойчивости структуры связей в дислокационном ядре по отношению к состоянию электронной подсистемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (Грант № 19-79-30086).

## Литература

1. K. Huang, A. Rhys // Proc. R. Soc. London, v. A 204, 406 (1950).
2. E. A. Ekimov, V. S. Krivobok, S. G. Lyapin, *et al.* // Physical Review B, v. 95, no. 9, 094113 (2017).
3. В. С. Кривобок, С. Н. Николаев, В. С. Багаев и др. // Письма в ЖЭТФ, в. 114, №2, 96 (2021).

# Рамановское охлаждение в субмикронных аттенюаторах, легированных оптически активными примесями

В.Г. Криштоп<sup>1</sup>, В.Г. Попов<sup>1</sup>, Д.А. Дворецкий<sup>2</sup>, К.Е. Бугай<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центр научных исследований и перспективных разработок, Инфотекс, Москва.

<sup>2</sup> ООО «СФБ Лаб», ул. Отрадная, д. 2Б, стр. 1, Москва, 127273.

\*Vladimir.Krishtop@infotecs.ru

В работе исследованы аттенюаторы, созданные на основе фосфоро-силикатных материалов, в которых роль комбинационного рассеяния на молекулярных колебаниях Р-О существенна. Оксид кремния, легированный фосфором, может обеспечить эффективный теплоотвод для интегральных оптических микросхем. Показано, что комбинационное рассеяние света на оптических примесях — эффективный метод теплопередачи и Рамановское охлаждение более эффективно, чем классическая теплопроводность.

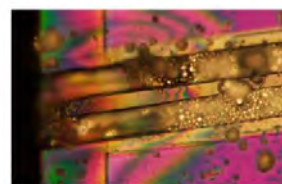
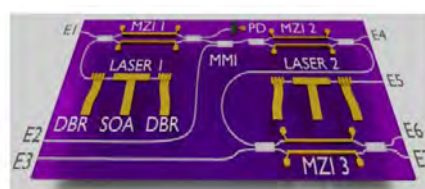
Развитие интегральной волноводной оптики и ее миниатюризация ставят новые задачи перед физикой, микроэлектроникой и материаловедением. С внедрением микроэлектронных интегральных технологий в волноводную оптику уменьшается размер и увеличивается плотность оптических элементов на чипе. Возникает задача повышения эффективности теплоотвода от волноводных аттенюаторов, и эта задача в интегральной оптике не менее актуальна, как в традиционной полупроводниковой микроэлектронике.

Данная проблема является критической в системах, предназначенных для квантового распределения ключей (КРК). Аттенюаторы с большими коэффициентами ослабления в десятки децибел используются в системах КРК для обеспечения квазиоднофотонного режима [1, 2]. При мощном лазерном воздействии возникает концентрация светового поля, которая приводит к сильному нагреву аттенюаторов. Из-за теплового расширения геометрия аттенюатора изменяется, и это может приводить к изменению степени ослабления аттенюатора и к нарушению однофотонного режима.

В работах [3-5] исследовались реальные системы квантового распределения ключей, имеющие в составе источника квантовых состояний МЭМС-аттенюатор, волоконно-оптический аттенюатор и индий-фосфорный выходной конвертор. На примере этих устройств было показано, что внешнее лазерное воздействие может приводить к нарушению однофотонного режима в системах КРК. Импульсы становятся существенно многофотонными что де-

лает протокол КРК уязвимым к атаке с расщеплением.

При разработке систем на чипе миниатюризация элементов сопровождается ухудшением теплоотвода и ухудшением проблем от локального нагрева. Классической теплопроводности материалов становится недостаточно для эффективного теплоотвода, и возникает задача разработки умных материалов, способных отводить тепло с помощью более эффективных физических процессов. На рис.1 приведено повреждение выходного конвертора внешней лазерной атакой.



**Рис. 1.** Схема PLC источника квантовых состояний на основе двух лазеров, интерферометров Маха-Цандера и фазовых модуляторов; на нижнем рисунке показано повреждение выходного конвертора внешней лазерной атакой [3]

Основная причина повреждения — тепловой нагрев конвертора или аттенюатора, приводящий к плавлению или термическому разрушению. Нагрев вызывается рассеиваемой оптической мощностью,



которая может передавать энергию колебаниям атомов волокна, например, через комбинационное рассеяние.

Рассеяние в волноводах идет по трем основным путям:

Стоксово рассеяние:

$$h\nu_{laser} = h\nu_{scatter} + h\nu_{NV}$$

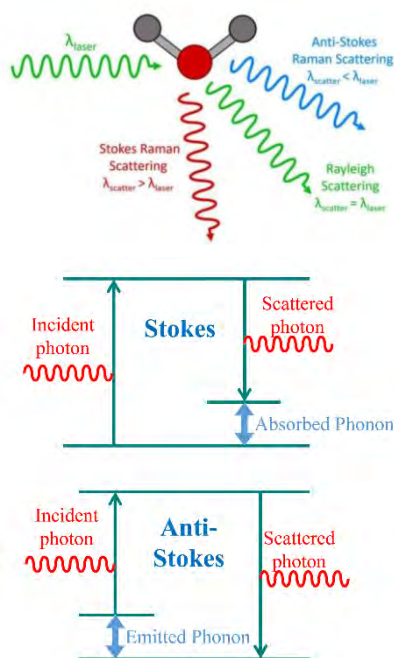
Антистоксово рассеяние:

$$h\nu_{laser} = h\nu_{scatter} - h\nu_{NV}$$

Релеевское (эластичное) рассеяние:

$$h\nu_{laser} = h\nu_{scatter}$$

Основные механизмы рассеяния схематически показаны на рис.2. Рассеяние может происходить с испусканием и поглощением фононов.

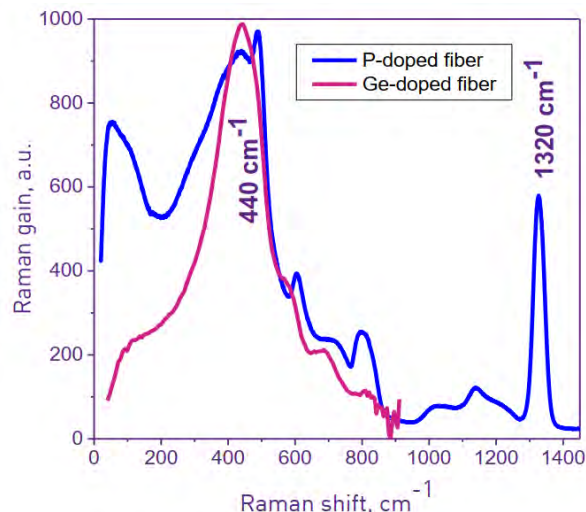


**Рис. 2.** Основные механизмы оптического рассеяния. Стоксово, антистоксово, и релеевское (эластичное) рассеяние

Существуют оптически-активные колебания, например, молекулярные колебания Si-O в волокне, которые поглощают мощность оптического излучения и отдают акустическим фононам, с которыми они хорошо взаимодействуют. В результате спектр комбинационного рассеяния для таких колебаний уширяется.

Особенностью волновода SiO<sub>2</sub>, легированного фосфором, является сильное комбинационное рассеяние света. При наличии примеси фосфора оптически активные колебания P-O слабо взаимодей-

ствуют с решеткой волновода, что обнаруживает в спектре комбинационного рассеяния острый пик (см рис. 3). Оптически активные колебания P-O могут эффективно перераспределять энергию в материале, снижая переход ее в тепло.



**Рис. 3.** Спектр комбинационного рассеяния света в волокне, легированном фосфором и германием. Максимум при 400 см<sup>-1</sup> соответствует рассеянию на Si-O колебаниях, а при 1320 см<sup>-1</sup> колебаниям P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Хотя интенсивность спонтанного КР довольно мала, следует принимать во внимание, что высокая интенсивность оптического излучения приводит к возникновению вынужденного рассеяния, и интенсивность вынужденного комбинационного рассеяния возрастает на несколько порядков и может становиться сопоставимой с интенсивностью накачки. Более того, КР может осуществляться как в режиме Стокса, так и режиме анти-Стокса, который связан с увеличением энергии фотонов за счет поглощения энергии из фононной подсистемы. Антистоксово рассеяние может приводить к эффективному охлаждению аттенюатора.

Таким образом, рассеяние на легирующих примесях способно существенно изменить перераспределение энергии в волоконно-оптических элементах, обеспечить эффективный отвод энергии и уменьшить локальный нагрев.

В случае волноводов на интегральном оптическом чипе, изготовленных литографически с эпитаксиальной кристаллической решеткой, можно излагать этот эффект в терминах избирательной накачки оптической и акустической фононной подсистемы. Рассеиваемая оптическая мощность вызывает локальный нагрев волокна благодаря перекачке энер-



гии в акустические фононы через комбинационное рассеяние (КР) света. Избирательная накачка фононной системы оптическими фононами приводит к эффективному выведению энергии из области с высокой плотностью оптического излучения.

Акустические и оптические фононы в кристаллах схематически изображены на рис. 4. Упрощенно можно полагать, что относительно «медленные» акустические фононы обеспечивают теплоемкость, а «быстрые» оптические фононы отвечают за теплопроводность в системе, и проблема в том, что в условиях мощного оптического излучения подсистемы оптических и акустических фононов быстро насыщаются, и классические теплоемкость и теплопроводность «не справляются» с охлаждением. Но при этом существует теоретическая возможность отбирать энергию у фононной подсистемы за счет стоксова рассеяния и эффективно отводить ее из пятна аттенуации с помощью «быстрых» оптических фононов.

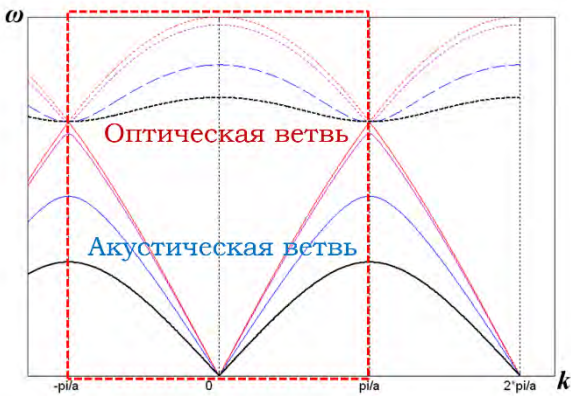


Рис. 4. Акустические и оптические фононы

В работе исследованы аттенуаторы, созданные на основе фосфо-силикатных материалов, в которых роль комбинационного рассеяния на молекулярных колебаниях Р-О существенна.

Предварительные измерения на примере сварных волоконных аттенуаторов с высокой степенью ослабления показали, что мощные ослабители на основе стандартного волокна подвержены просветлению при мощности излучения более 2.5 Вт, т.е. коэффициент ослабления уменьшается на 20-25дБ. Данный эффект подтвержден в литературе [3]. При этом использование легированного фосфором волокна увеличивает порог просветления до 3.6 Вт [5], что свидетельствует в пользу эффективной перекачки энергии молекулярными колебаниями.

Схема эксперимента показана на рис.5. Исследованные аттенуаторы 8 дБ и 22 дБ показаны на рис.6.

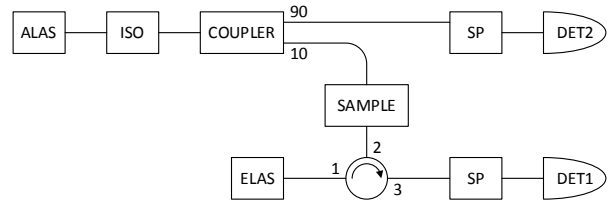


Рис. 5. Экспериментальная установка. ALAS – контрольный лазер (Алиса); ISO – оптический изолятор; COUPLER – оптоволоконный делитель 10/90; SP – узкополосный спектральный фильтр; ELAS – атакующий лазер (Ева); DET1 и DET2 – измерители оптической мощности; SAMPLE – испытываемый аттенуатор

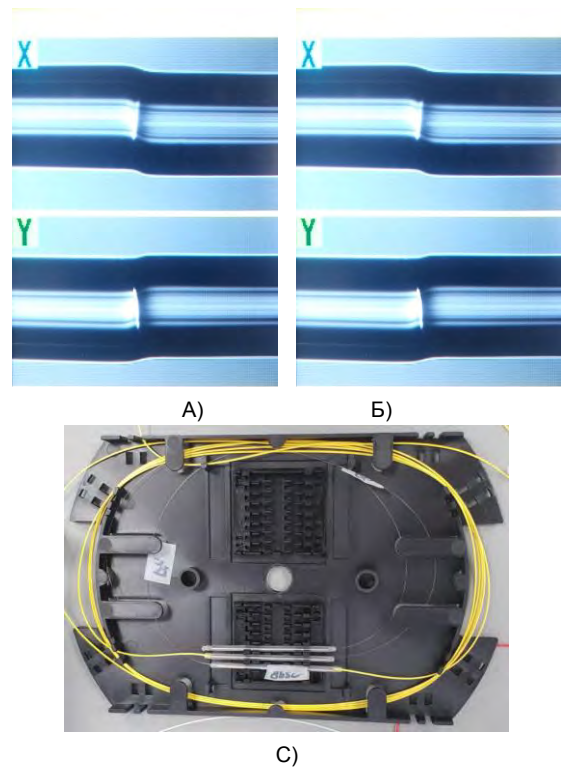
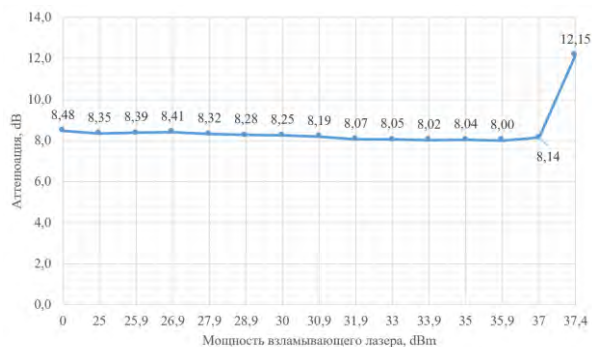


Рис. 6. Сварные аттенуаторы на волокне, легированном фосфором. А) 8дБ, Б) 22дБ, С) Сварной аттенуатор в сплайскассете

Аттенуаторы на основе волокна, легированного фосфором, тестировались на устойчивость к атаке с лазерным повреждением компонентов (LDA). На них подавалось непрерывное мощное лазерное излучение от 25 дБм (316,23 мВт) до 37,4 дБм (5495,41 мВт). Зависимость поглощения аттенуатора от мощности взламывающего лазера показана на Рис.7.



**Рис. 7.** Зависимость поглощения аттенюатора от мощности взламывающего лазера. При превышении мощности лазера более 37 дБм степень аттенюации растет, фосфорные аттенюаторы не просветляются

Одним из неожиданных результатов стало возгорание оболочки гильзы фосфорных аттенюаторов в точке выхода оптоволокна из гильзы при мощностях более 34 дБм. Расстояние от точки возгорания до пятна аттенюации составило при этом около 25 мм, а характеристики аттенюатора продолжали оставаться стабильными вплоть до термического разрушения оптоволокна в точке возгорания. Это, во-первых, существенно отличается от поведения аттенюатора на стандартном волокне. Стандартный аттенюатор просветляется под воздействием лазерного излучения сравнимой мощности, теряет степень аттенюации, но при этом не загорается и не сгорает, в связи с чем и становится возможна атака LDA. И во-вторых, возгорание на существенном расстоянии от точки аттенюации свидетельствует об эффективном отводе энергии (тепла) из пятна сварки, что доказывает работоспособность предложенного механизма лазерного охлаждения на оптически активных примесях при высоких мощностях оптического излучения.

## Заключение

Волоконные аттенюаторы, легированные фосфором, устойчивы к LDA, их можно использовать как «оптический предохранитель» для защиты от атаки LDA.

Комбинационное рассеяние света на оптических примесях — эффективный метод теплопередачи. Рамановское охлаждение более эффективно, чем классическая теплопроводность.

Оксид кремния, легированный фосфором, может обеспечить эффективный теплоотвод для интегральных оптических микросхем.

## Литература

1. E. Diamanti, H.-K. Lo, B. Qi, Z. Yuan // *npj Quantum Information*, vol. 2, p. 1–12 (2016).
2. E. Diamanti and A. Leverrier // *Entropy*, vol. 17, p. 6072–6092 (2015).
3. A. Huang, R. Li, V. Egorov, *et al.* // *Phys. Rev. Applied* 13, 034017 (2020) doi: 10.1103/PhysRevApplied.13.034017
4. V. Makarov, J.-P. Bourgoïn, P. Chaiwongkhot, *et al.* // *Phys. Rev. A* 94, 030302(R) (2015) doi: 10.1103/PhysRevA.94.030302
5. A. Huang, Á. Navarrete, S.-H. Sun, *et al.* // *Phys. Rev. Appl.* 12, 064043 (2019). doi: 10.1103/PhysRevApplied.12.064043
6. V. G. Krishtop, V. G. Popov, D. A. Dvoretzky, *et al.* // SNAIA-2021. Book of Abstracts. 4th Smart Nanomaterials: Advances, Innovations and Applications Conference, pp. 146-147 (2021).

# Влияние температуры роста на свойства системы GaAs/дельта-Mn

Р.Н. Крюков<sup>1,2,\*</sup>, В.Е. Захаров<sup>1,§</sup>, Д.Е. Николичев<sup>1,2</sup>, С.Ю. Зубков<sup>1,2</sup>, М.В. Дорохин<sup>1,2</sup>, Б.Н. Звонков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup>НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*kriukov.ruslan@yandex.ru, §rachitelnicc@mail.ru

Установлено, что уменьшение температуры роста покровных слоев GaAs при импульсном лазерном осаждении замедляет процесс сегрегации и предотвращает окисление атомов Mn. Также уменьшение температуры роста приводит к увеличению концентрации As в слое GaAs и обуславливает присутствие в слое полупроводника элементного As. Для структур, включающих индий-содержащие слои, увеличение температуры роста GaAs приводит к сегрегации атомов индия на поверхности.

## Введение

Оптимизация параметров ростового процесса разбавленного магнитного полупроводника (РМП) GaMnAs направлена на сохранение его свойств в рабочих структурах. Для системы GaMnAs характерно окисление в кислородсодержащей атмосфере [1] и сегрегация атомов металла [2]. Такая эволюция провоцирует сокращение электрически активной примеси и появление оксидов с различными магнитными свойствами. Для минимизации окислительной реакции часто используют покровный слой GaAs. При этом он, как и активный слой GaMnAs, формируется при относительно низких температурах (200 – 300 °С). Последнее обстоятельство приводит к возрастанию дефектности полупроводника [3], что влияет на диффузионные процессы и электрические характеристики в системе GaAs/GaMnAs. Таким образом, существует задача оптимизации технологии роста низкотемпературного арсенида галлия (НТ-GaAs), и она напрямую связана с контролем химического состава получаемых структур.

## Методика эксперимента

Изучались системы, представляющие собой спиновый светоизлучающий диод (ССИД), создаваемый по двухстадийной технологии. На первом этапе методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС ГФЭ) выращивались буферный слой, квантовая яма  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x \sim 0,13$ , толщина 10 нм) и спейсер при 600°С. Второй этап включал осаждение методом импульсного лазерного осаждения дельта-слоя Mn и покровного слоя НТ-GaAs (10 нм). Температура роста послед-

него составляла 250 (образец 1) и 400°С (образец 2).

В качестве газа-носителя использовался арсин с одинаковым для всех структур давлением в камере роста [4]. Для рассмотрения влияния температуры роста на состав слоев использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, описание методики эксперимента представлено в [5].

## Результаты

В ходе работы установлено, что понижение температуры роста приводит к дисбалансу состава в полупроводнике: соотношение концентраций As и Ga становится равным 3/2, и это связано с дополнительным источником мышьяка в ростовой установке. Выявлено, что уменьшение температуры приводит к увеличению толщины покровного слоя, что связывается с наличием избыточного мышьяка. Природа эффекта пока точно не установлена. Выращивание покровного слоя при 400°С сопровождается сегрегацией Mn на поверхности образца (рисунки 1, б), где атомы металла пассивируются путем окисления. Понижение температуры до 250°С останавливает этот процесс (рисунок 1, а). Следует отметить, что на профиле распределения химических элементов в образце 1 кислород в процессе его диффузии [1], характерной для такого рода систем, не достиг глубины залегания марганца. В образце 2 ситуация противоположная, вследствие более высокой температуры осаждения покровного слоя.

При анализе фотоэлектронных линий Ga 3d и As 3d с использованием данных [6] было установлено, что избыточность As в образце 1 объясняется присутствием в системе элементного мышьяка и включений дефектных кластеров As (димеры, анти-

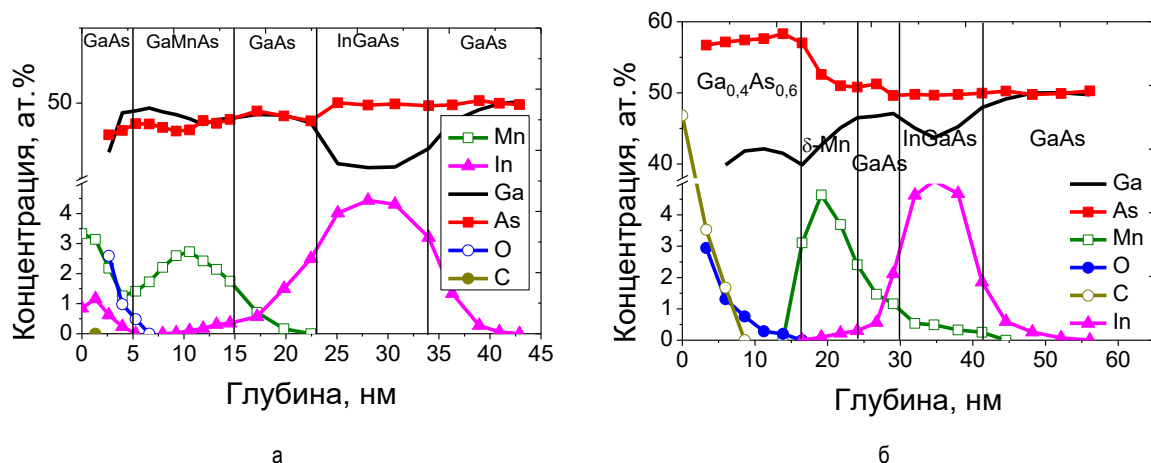


Рис. 1. Профили распределения химических элементов по глубине в структурах ССИД с температурой роста покровного слоя а) 400°C и б) 250°C

структурные дефекты). Дефектный As наблюдается на протяжении всего покровного слоя на уровне концентрации  $\sim 10$  ат.%. Такого рода особенность может повлиять на электрические характеристики (подвижность, концентрацию носителей заряда), слоев, матрицей для которых является НТ-GaAs, например, РМП. Стоит также уточнить, что в структуре 2 на поверхности детектируется In, что предположительно связано с процессом сегрегации его атомов на поверхности при температуре роста 400°C, поскольку в образце 1 такой особенности не наблюдалось. Таким образом, температура роста НТ-GaAs оказывает влияние на химический состав, и, предположительно, на электрические свойства слоев, для которых НТ-GaAs является основой. Выявлено, что изменение температуры роста, и, как следствие, изменение состава покровного слоя влияет на распределение по глубине химических элементов в приборных структурах.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ МК-265.2022.1.2.

## Литература

1. J.F. Xu, P.M. Thibado, C. Awo-Affouda *et al.* // *J. of Crys. Growth*, V. 301-302, 54 (2007).
2. Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.Ю. Зубков *и др.* // *Вестник Нижегородского университета*, № 1, 48 (2013).
3. A. Wolos, M. Kaminska, M. Palczewska *et al.* // *J. of Appl.Phys.*, V. 96, 530 (2004).
4. М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.С. Бричкин *и др.* // *ФТТ*, Т. 52, 2147(2010).
5. A.V. Boryakov, S.I. Surodin, R.N. Kryukov and *et al.* // *J. of Elect. Spectr. and Related Phen*, V. 50, 1443 (2018).
6. F.P. Zhang, P.S. Xu, C.G. Zhuand *et al.* // *J. of Elect. Spectr. and Related Phen*, V. 101-103, 485 (1999).

# Эпитаксиальные слои магнитного полупроводника InGaAs:Fe

А.В. Кудрин<sup>1,2</sup>, В.П. Лесников<sup>1,2</sup>, А.А. Яковлева<sup>1</sup>, Р.Н. Крюков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23/3, 603950 Нижний Новгород.

<sup>2</sup> НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*kudrin@nifti.unn.ru

Методом лазерного распыления твердотельных мишеней в вакууме были сформированы слои магнитного полупроводника InGaAs:Fe. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии был исследован состав структур. Установлено что при концентрации атомов Fe равной 25 ат. % максимальная концентрация In составляет 7 ат. %.

## Введение

Недавно были получены эпитаксиальные однофазные слои магнитного полупроводника GaAs:Fe с концентрацией железа до 20 ат. %. Слои GaAs:Fe демонстрируют собственный (intrinsic) ферромагнетизм и имеют температуру Кюри превышающую 300 К [1]. Было предположено, что атомы Fe формируют примесную зону внутри запрещенной зоны GaAs. Транспортные свойства материала определяются переносом носителей заряда по примесной зоне Fe. Вероятным механизмом косвенного ферромагнитного обмена между атомами Fe является механизм двойного обмена Зинера, возникающей при переходе электрона между ближайшими атомами Fe с различным заполнением  $d$  оболочки ( $3d^5$  и  $3d^6$ ). С точки зрения физики магнитных полупроводников  $A^3B^5$  представляет интерес развитие указанного материала в направлении исследования свойств твердого раствора InGaAs, сильно легированного Fe. Известно, что в InGaAs акцепторный уровень (отщепленный кристаллическим полем уровня  $e$ ) уменьшает свою глубину относительно края валентной зоны с увеличением концентрации In. Слои InGaAs, сильно легированные Fe (до 20 ат. %) до настоящего времени получены не были. В работе представляем результаты по формированию и исследованию слоев InGaAs:Fe с концентрацией Fe до 25 ат. %.

## Методика эксперимента

Слои InGaAs:Fe были получены на подложках GaAs методом лазерного распыления твердотельных мишеней GaAs, InAs и Fe в вакууме при температуре ростового процесса 220 °С. Технологическое количество In в слое InGaAs:Fe составляло 13,

17 и 25 ат. %. Технологическое количество Fe составляло 25 ат. %. Состав полученных структур были исследованы методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) дополненным возможностью профилирования по глубине. Для сформированных слоев были проведены исследования магнитного циркулярного дихроизма на отражение в диапазоне энергий света 1.2 – 2.5 эВ при температурах 20 – 300 К.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен РФЭС профиль распределения элементов по глубине структуры InGaAs:Fe/GaAs со слоем InGaAs:Fe с максимальной технологической концентрацией In (25 ат. %).

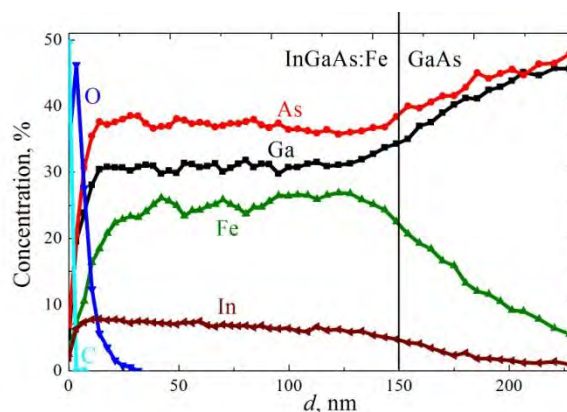


Рис. 1. РФЭС профиль распределения атомов по глубине для структуры InGaAs:Fe/GaAs

По данным РФЭС фактическая концентрация Fe в слое InGaAs:Fe совпадает с технологической ( $\approx 25$  ат. %). При этом концентрация фактическая концентрация In ( $\approx 7$  ат. %) значительно меньше технологической (25 ат. %). Суммарная концентрация атомов In и Ga ( $\approx 37$  ат. %) совпадает с концен-



трацией атомов As ( $\approx 37$  ат. %). Следовательно в InGaAs:Fe атомы Fe равновероятно замещают как атомы III группы, так и V. Подобное поведение атомов Fe наблюдалось в слоях GaAs:Fe [1]. Интересной особенностью состава полученных слоев InGaAs:Fe является то, что по данным РФЭС исследований концентрация In остается одинаковой ( $\approx 7$  ат. %) в слоях с технологической концентрацией In равной 13, 17 и 25 ат. %. Это можно объяснить тем, что атомы Fe имеют большую вероятность встроиться в подрешетку III группы, чем атомы In. При фиксированной концентрации Fe в положении замещения элемента III группы ( $\approx 12$  ат. %), возможная концентрация In составляет максимум  $\approx 7$  ат. %.

На рисунке 2 представлены магнитопольные зависимости величины магнитного циркулярного дихроизма ( $MCD(H)$ ) для энергии квантов света 1.9 эВ, полученные при 20 и 300 К. Зависимости  $MCD(H)$  являются нелинейными, что свидетельствует о наличии магнитных свойств в слое InGaAs:Fe. При 20 К зависимость  $MCD(H)$  имеет ярко выраженный гистерезис.

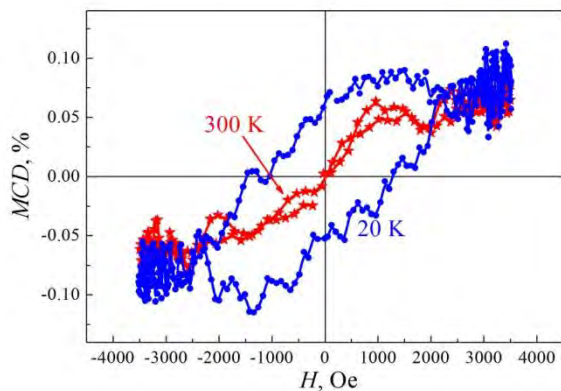


Рис. 2. Зависимости  $MCD(H)$  для слоя InGaAs:Fe при 20 и 300 К для энергии квантов света 1.9 эВ

На рисунке 3 представлены спектральные зависимости эффекта магнитного циркулярного дихроизма для слоев GaAs:Fe и InGaAs:Fe при 20 К. При энергии квантов света меньшей, чем ширина запрещенной зоны GaAs наблюдается значительный спад величины эффекта магнитного циркулярного дихроизма. Это свидетельствует о том, что ферромагнитные свойства слоев GaAs:Fe и InGaAs:Fe связаны с собственным ферромагнетизмом матрицы магнитного полупроводника, а не с какими-либо включениями второй ферромагнитной фазы. Схожая спектральная зависимость для слоев GaAs:Fe и InGaAs:Fe связана с относительно малой фактической концентрацией In в слое InGaAs:Fe.

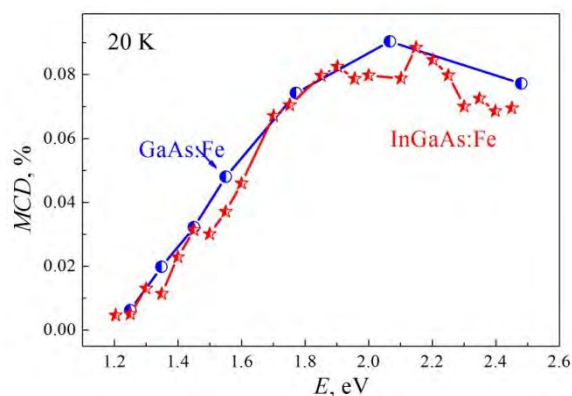


Рис. 3. Спектральная зависимость величины эффекта магнитного циркулярного дихроизма для слоев GaAs:Fe и InGaAs:Fe при 20 К

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-03-2020-191/5).

## Литература

1. A. V. Kudrin et. al., Sem. Sci. Tech. 35, 125032 (2020).



# Лазерные гетероструктуры с КЯ HgTe/CdHgTe среднего ИК диапазона: анализ оже-процессов и температурного гашения стимулированного излучения

К.Е. Кудрявцев<sup>1, &</sup>, В.В. Румянцев<sup>1</sup>, В.В. Уточкин<sup>1</sup>, В.Я. Алешкин<sup>1</sup>, А.А. Дубинов<sup>1</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>2</sup>, С.А. Дворецкий<sup>2</sup>, В.И. Гавриленко<sup>1</sup>, С.В. Морозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>&</sup>konstantin@ipmras.ru

В работе исследован характер температурного гашения стимулированного излучения (СИ) среднего ИК диапазона (5-8 мкм) в гетероструктурах с КЯ Hg(Cd)Te/CdHgTe. На основании измерений порога СИ в зависимости от температуры установлено, что доминирующим механизмом межзонной рекомбинации избыточных носителей заряда является «объемноподобная» пороговая оже-рекомбинация вида *ССН-С* (*eeh*), в то время как конкурирующие процессы вида *СНН-Н* (*ehh*), в том числе специфичные для структур с КЯ «беспороговые» процессы, проявляются слабо. Показано, что максимальная температура наблюдения СИ в исследуемых КЯ определяется эффектами разогрева избыточных носителей при больших мощностях накачки (как прямого разогрева, так и косвенного в ходе оже-рекомбинации электронов и дырок).

## Введение

Хорошо известная и отработанная как основа для ИК-фотодетекторов, работающих в крайне широком диапазоне длин волн, система кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe) может рассматриваться также и как базовый материал светоизлучающих (лазерных) структур. В то время как продвижение межзонных лазеров в длинноволновую область ограничено возрастанием темпов безызлучательной оже-рекомбинации, характерным для узкозонных полупроводников, в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe в окрестности Г-точки зоны Бриллюэна может быть реализован «симметричный» для электронов и дырок закон дисперсии носителей, что определяет высокий энергетический порог оже-процессов и приводит к частичному их подавлению. За счет этого структуры с КЯ позволяют значительно продвинуться (в сравнении с объемным HgCdTe) в сторону длинноволновой генерации [1]. В данной работе приводятся первые экспериментальные результаты, направленные на детальный «полуколичественный» анализ оже-процессов в КЯ HgTe/CdHgTe.

Исследуется температурное гашение СИ в гетероструктурах среднего ИК диапазона ( $\lambda_{SE} \sim 5-6$  мкм при  $T \sim 200$  К) в попытке выявить индивидуальные вклады различных оже-процессов в межзонную динамику носителей, а также определить механизмы, ограничивающие максимальную тем-

пературу генерации для структур с оптической накачкой.

## Образцы и методика эксперимента

Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках (013)GaAs с буферными слоями ZnTe/CdTe и содержали по 5 КЯ HgTe, разделенных барьерами Cd<sub>0.6</sub>Hg<sub>0.4</sub>Te шириной 50 нм и встроенных в волноводный слой (также Cd<sub>0.6</sub>Hg<sub>0.4</sub>Te) общей толщиной  $\sim 5$  мкм. Ширина КЯ составляла, по данным эллипсометрии, 4.1-4.3 нм, в то время как остаточное содержание кадмия в КЯ оценено, по данным низкотемпературной ФЛ, на уровне  $\sim 7-10\%$ . При измерениях спонтанной ФЛ и регистрации стимулированного излучения накачка образца осуществлялась импульсным параметрическим генератором света ( $\tau \sim 10$  нс,  $\lambda \sim 2.0-2.3$  мкм, пиковая мощность до 350 кВт/см<sup>2</sup>). Излучение образца детектировалось HgCdTe приемником; спектры эмиссии регистрировались в режиме пошагового сканирования фурье-спектрометром Bruker Vertex 80v. Образец размещался в гелиевом криостате замкнутого цикла ( $T = 10-300$  К).

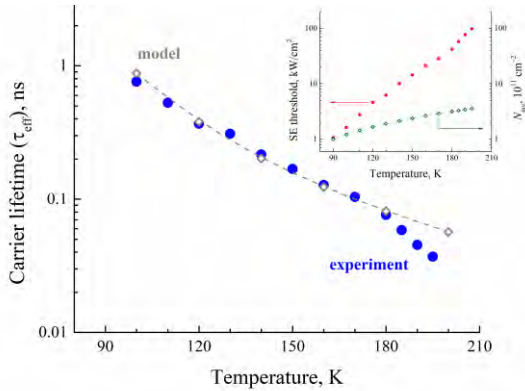
## Результаты и обсуждение

Поскольку для рассматриваемых КЯ HgTe/CdHgTe сложно реализовать прямое измерение межзонной динамики носителей заряда (например, по кинетике

фотопроводимости), темп безызлучательных процессов в данной работе оценивается косвенно, на основании измеряемого порога возникновения СИ с использованием простого соотношения

$$\tau_{eff} = \frac{n_{th}}{\alpha_{QW} G_{th}}, \quad (1)$$

где  $n_{th}$  и  $G_{th}$  — «пороговая» концентрация носителей заряда (принимаемая равной концентрации «просветления» КЯ  $N_{inv}$ ) и поток фотонов накачки, соответствующий порогу СИ, соответственно,  $\alpha_{QW} \approx 0.01$  — коэффициент поглощения излучения КЯ в режиме прямой накачки. Также предполагается квазистационарный режим накачки в пределах импульса возбуждения ( $\tau_{eff} \ll \tau_{pump}$ ), что оправдано при не слишком низких температурах. Исходные данные и результаты моделирования приведены на рис. 1.



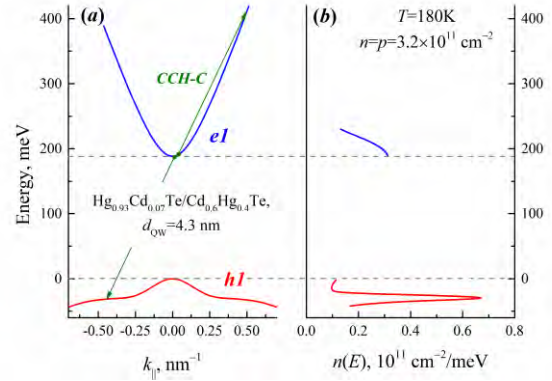
**Рис. 1.** Эффективное время межзонной рекомбинации в исследуемых КЯ вблизи порога СИ в зависимости от температуры: оценки (experiment) согласно (1) и модельная кривая (model) для *CCH-C* оже-процесса в соответствии с (2). На вставке: измеренный порог СИ и расчетная величина  $N_{inv}$

Модельная кривая  $\tau_{eff}(T)$  на рис. 1 описывается выражением вида

$$\tau_{CCH-C}^{-1}(T) = C_A \times N_{inv}^3(T) \times f_h(T), \quad (2)$$

где  $C_A$  — подгоночный параметр, соответствующий «микроскопическому» значению коэффициента оже-рекомбинации, а  $f_h(T)$  — доля «надпороговых» (по отношению к расчетному порогу *CCH-C* процесса). При этом подобная простейшая модель дает весьма хорошее согласие с экспериментом, что обусловлено следующими факторами: (i) почти вся

«пороговая энергия», необходимая для *CCH-C* процесса, переносится именно дырками и (ii) значительная часть дырок при достаточно высоких температурах обладает хорошо определенной кинетической энергией вблизи этого порога. Оба обстоятельства следуют из особого вида закона дисперсии дырок с выраженными «плечами» и проиллюстрировано на рис. 2.



**Рис. 2.** (а) дисперсия электронов и дырок в рассматриваемых КЯ; стрелками схематично указана оже-рекомбинация вида *CCH-C*; (б) распределение носителей по энергиям при концентрации, соответствующей порогу СИ. Все данные для  $T=180K$

Заметим, что отклонение модели от эксперимента при  $T > 180K$  не связано, по-видимому, с подключением дополнительных оже-процессов либо механизмов поглощения, а отражает постепенный разогрев электронного газа излучением накачки при всё большем пороге возникновения СИ, что и ограничивает максимальную температуру генерации. Это напрямую подтверждается анализом вида спектров спонтанной эмиссии в «предпороговом» режиме. Соответствующие детали работы приводятся в [2].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант 075-15-2020-797 (соглашение 13.1902.21.0024) на оборудовании ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур» ИФМ РАН.

### Литература

1. S.V. Morozov, V.V. Rumyantsev et al. // ACS Photonics 8(12), 3526 (2021).
2. K.E. Kudryavtsev, V.V. Rumyantsev et al. // J.Appl.Phys. 130, 214302 (2021).

# Взаимодействие электромагнитной Н-волны с полупроводниковым нанослоем

И.А. Кузнецова<sup>1</sup>, О.В. Савенко<sup>2</sup>

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, ул. Советская, 14, Ярославль, 150003.

<sup>1</sup>kuz@uniyar.ac.ru, <sup>2</sup>o.savenko@uniyar.ac.ru

В рамках квантовой теории явлений переноса построена теоретическая модель взаимодействия электромагнитной волны Н-конфигурации с полупроводниковым нанослоем. Диапазон частот электромагнитной волны ограничен сверху частотами ближнего ИК-диапазона. Задача решена с учетом модели граничных условий Соффера. Получены аналитические выражения для оптических коэффициентов как функций безразмерной толщины, частоты и угла падения электромагнитной волны, химического потенциала и параметров шероховатости поверхностей. Сделан расчет для предельных случаев вырожденного и невырожденного электронного газа. Проанализированы зависимости оптических коэффициентов от вышеназванных параметров.

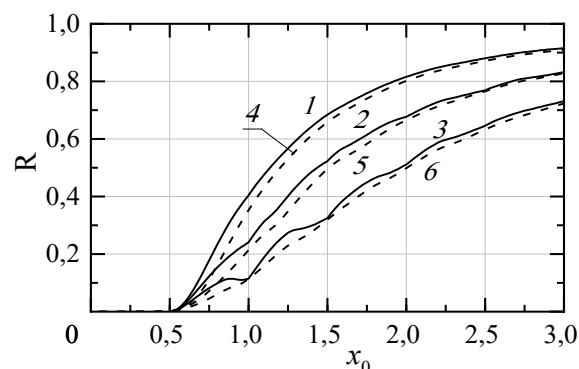
В настоящей работе решена задача о взаимодействии электромагнитной волны с полупроводниковым нанослоем. Предполагается, что вектор напряженности электрического поля параллелен плоскости нанослоя (Н-конфигурация). Считается, что толщина нанослоя может быть сравнима или меньше длины волны де Бройля носителей заряда. Задача решена с учетом квантовой теории явлений переноса, заключающейся в нахождении матричных элементов оператора плотности решением уравнения Лиувилля. В работе [1] показано, что в случае малого отклонения системы носителей заряда от равновесного состояния объемное рассеяние можно выразить при помощи времени релаксации. Поверхностное рассеяние носителей учитывается через граничные условия Соффера [2], накладываемые на уравнение Лиувилля. Найденные матричные элементы оператора плотности позволяют рассчитать плотность тока, индуцируемого электромагнитным излучением.

В настоящей работе считается, что частота электромагнитной волны много меньше частоты плазменного резонанса, т.е. ограничена сверху частотами ближнего ИК-диапазона. Рассматривается случай слабой электромагнитной волны, и эффекты, связанные с квантовой природой электромагнитного излучения, не учитываются. При помощи системы уравнений Максвелла находится связь между плотностью тока и оптическими коэффициентами нанослоя. Получены аналитические выражения для коэффициентов отражения, пропускания и поглощения как функции безразмерной толщины  $x_0$ , частоты электрического поля  $\nu_0$ , длины свободного пробега носителей заряда  $x_\lambda$ , химического потенциала  $\mu_c$ , угла падения электромагнитной волны  $\theta$  и параметров шероховатости поверхностей  $g_{1,2}$ . Па-

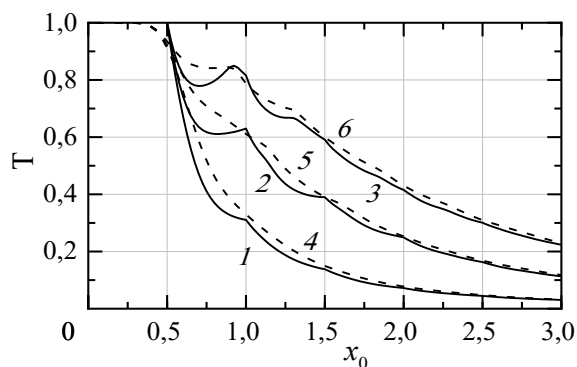
раметры  $x_0$ ,  $x_\lambda$ ,  $g_{1,2}$  обезразмерены на длину волны де Бройля носителей заряда. Рассмотрены предельные случаи вырожденного и невырожденного электронного газа.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 – 3 построены зависимости коэффициентов отражения, пропускания и поглощения от безразмерной толщины. Параметры шероховатости поверхностей равны 0,15, а угол падения электромагнитной волны равен  $72^\circ$ . На рис. 1 и 2 показано, что с уменьшением толщины коэффициент отражения убывает, а коэффициент пропускания растет. Это можно объяснить уменьшением концентрации отвечающих за формирование вторичной отраженной волны свободных носителей заряда из-за сокращения числа разрешенных энергетических состояний. При значении  $x_0 < 0.5$  электромагнитное излучение практически полностью проходит через нанослой.



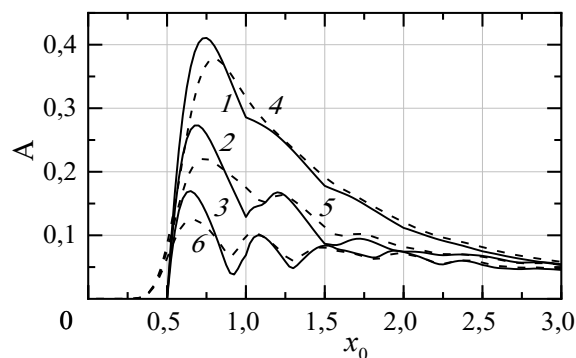
**Рис. 1.** Зависимости коэффициента отражения  $R$  от безразмерной толщины  $x_0$  при значениях  $g_1 = g_2 = 0,15$ ;  $x_\lambda = 8$ ;  $\theta = 72^\circ$ : 1, 4:  $\nu_0 = 10$ ; 2, 5:  $\nu_0 = 20$ ; 3, 6:  $\nu_0 = 30$ . Сплошные кривые 1 – 3 построены для случая вырожденного, а пунктирные 2 – 4 – невырожденного электронного газа



**Рис. 2.** Зависимости коэффициента пропускания  $T$  от безразмерной толщины  $x_0$  при значениях  $g_1 = g_2 = 0,15$ ;  $\chi_\lambda = 8$ ;  $\theta = 72^\circ$ : 1, 4:  $y_0 = 10$ ; 2, 5:  $y_0 = 20$ ; 3, 6:  $y_0 = 30$ . Сплошные кривые 1 – 3 построены для случая вырожденного, а пунктирные 2 – 4 – невырожденного электронного газа

Обнаружены осцилляции зависимостей оптических коэффициентов от толщины. Заметим, что частота электрического поля влияет на период этих осцилляций. Возможная причина заключается в следующем. Перпендикулярная компонента вектора скорости и частота поверхностного рассеяния принимают дискретный ряд значений. При определенных значениях  $x_0$  и  $y_0$  часть носителей заряда испытывает поверхностное рассеяние в момент изменения ориентации напряженности электрического поля, и поверхность нанослоя слабо влияет на его оптические характеристики: наблюдаются минимумы коэффициента поглощения и максимумы пропускания. В случае невырожденного электронного газа осцилляции зависимостей оптических коэффициен-

тов от толщины менее ярко выражены, чем в случае вырожденного газа. При относительно небольших частотах (кривые 1 – 4) вышеназванный осцилляционный эффект практически пропадает. Наблюдаются лишь небольшие осцилляции коэффициентов пропускания и поглощения в случае вырожденного электронного газа, вызванные скачками плотности состояний, период которых составляет половину длины волны де Бройля носителей заряда ( $x_0 = 0,5$ ).



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента поглощения  $A$  от безразмерной толщины  $x_0$  при значениях  $g_1 = g_2 = 0,15$ ;  $\chi_\lambda = 8$ ;  $\theta = 72^\circ$ : 1, 4:  $y_0 = 10$ ; 2, 5:  $y_0 = 20$ ; 3, 6:  $y_0 = 30$ . Сплошные кривые 1 – 3 построены для случая вырожденного, а пунктирные 2 – 4 – невырожденного электронного газа

## Литература

1. И.А. Кузнецова, О.В. Савенко, Д.Н. Романов // ФТП, Т. 55(9), 789 (2021).
2. S.B. Soffer // J. Appl. Phys., V. 38, 1710 (1967).

# Времена ядерной спиновой релаксации в структурах GaAs:Mn

М.С. Кузнецова<sup>1,\*</sup>, А.Е. Евдокимов<sup>1</sup>, А.В. Михайлов<sup>1</sup>, К.В. Кавокин<sup>1</sup>, Р.И. Джиоев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СОЛАБ, Санкт Петербургский государственный университет, 198504, СПб, Россия.

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, РАН, 194021 СПб, Россия.

\*mashakuznecova@bk.ru

В настоящей работе экспериментально исследована спиновая релаксация электронов и их взаимодействие с ядерными спинами в эпитаксиальных слоях p-GaAs, легированного Mn, путем изучения эффекта Ханле при фиксированном знаке поляризации оптического возбуждения.

## Введение

Понимание механизмов спиновой релаксации в твердых телах является предпосылкой к развитию спинтроники. Время спиновой релаксации электронов в n-GaAs в диапазоне концентраций доноров  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$  составляет порядка или больше 100 нс [1]. В то же время, релаксация электронного спина в p-GaAs, обусловленная механизмом Бира-Аронова-Пикуса (БАП), оказывается существенно более быстрой даже при низких температурах ( $\tau_s = 1 \text{ нс}$ ) [2]. В работе [3] продемонстрировано, что легирование p-GaAs магнитными акцепторами Mn позволяет существенно подавить спиновую релаксацию БАП за счёт компенсации магнитных моментов локализованных дырок и d-электронов Mn. При этом на первый план выходят механизмы спиновой релаксации, характерные для полупроводников n-типа: спин-орбитальное взаимодействие и сверхтонкое взаимодействие со спинами ядер решётки [1].

Спиновая релаксация ядер и их взаимодействие с электронными спинами в GaAs:Mn не исследованы. В GaAs без магнитной примеси эти явления качественно различаются, что проявляется в диапазоне времен  $T_1$  (миллисекунды в p-GaAs и секунды в n-GaAs) и магнитопольных зависимостях (замедление релаксации с ростом магнитного поля в диапазоне 0–20 Гс в n-GaAs и отсутствие зависимости  $T_1$  от поля в p-GaAs) [4].

В настоящей работе подробно исследована спиновая релаксация электронов и их взаимодействие с ядерными спинами в p-GaAs, легированного Mn, путем измерения кривой Ханле при фиксированном знаке поляризации возбуждения.

## Методика эксперимента

Исследования проводились в объемных слоях GaAs легированного Mn, выращенного методом жидко-

фазной эпитаксии. Степень легирования образца составляет  $N_{\text{Mn}} = 2.77 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{d}} - N_{\text{a}} = 3.44 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , где  $N_{\text{Mn}}$ ,  $N_{\text{d}}$  и  $N_{\text{a}}$  – концентрации акцептора Mn, мелкого донора и акцептора соответственно.

Типичный спектр фотолюминесценции (ФЛ) в структуре GaAs:Mn в зависимости от мощности накачки представлен на рисунке 1. Пик ФЛ на энергии 1.51 эВ соответствует излучению свободных или локализованных на доноре экситонов (X). Пик с энергией 1.41 эВ соответствует переходу Mn. Линия, связанная с переходом на Mn наблюдается при всех значениях мощности накачки, в то время как экситонная линия появляется после критических мощностей  $P = 2\text{--}5 \text{ В}$ .

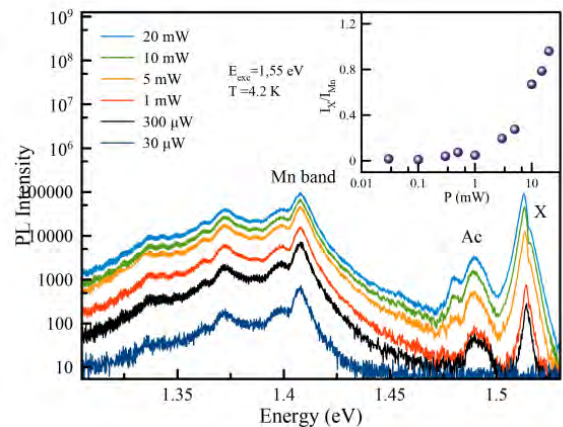
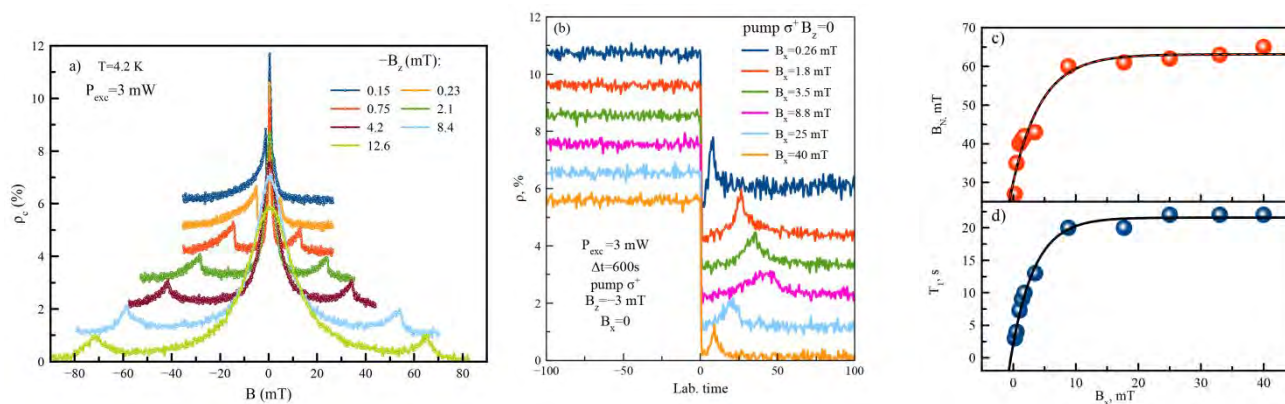


Рис. 1. Спектры ФЛ при различных мощностях оптического возбуждения. На вставке представлена зависимость отношения интенсивностей линии экситона и Mn

Для изучения электронно-ядерной спиновой динамики мы измерили серию кривых Ханле при фиксированной поляризации оптического возбуждения для разных мощностей оптической накачки. Для более эффективной накачки ядерного поля применяется продольное магнитное поле  $B_z$  (см. рис.2а). Из рисунка видно, что кривая Ханле со-

стоит из узкой центральной части и дополнительных максимумов, наличие которых свидетельствуют о присутствии поляризации ядерных спинов и создании динамической ядерной поля-

ризации. При увеличении значения продольного магнитного поля, дополнительные пики сдвигаются в область больших поперечных магнитных полей.



**Рис. 2.** (а) Кривые Ханле, измеренные при различных мощностях оптической накачки и приложении продольных магнитных полей. (б) Кривые изменения степени поляризации ФЛ после адиабатического размагничивания. (с) зависимость значения ядерного магнитного поля от приложенного внешнего поперечного поля. (д) Зависимость времени ядерной спиновой релаксации от внешнего поперечного магнитного поля

Для определения значений ядерного магнитного поля и времени ядерной спиновой релаксации, мы провели серию измерений степени поляризации фотолюминесценции после адиабатического размагничивания от продольного поля  $B_z$  к различным поперечным магнитным полям  $B_x$ . На рис. 1b показаны такие зависимости для отрицательного значения  $B_z = 3$  мТл и различных значениях поперечных магнитных полей. Из рисунка видно, что в момент компенсации внешнего поперечного магнитного поля ядерным полем, электронная спиновая поляризация увеличивается, так как суммарное внешнее поле, действующее на электроны, уменьшается.

Из анализа кривых, представленных на рисунке 2b, мы определили зависимости поля  $B_N$  и времени ядерной спиновой релаксации  $T_1$  от поперечного магнитного поля (рис. 2c, 2d).

## Результаты и обсуждения

В результате анализа мы получили максимальное ядерное поле 60 мТл, что хорошо соответствует положению дополнительного пика на кривой Ханле, измеренного при приложении максимального продольного поля. Неожиданным результатом яв-

ляются, масштаб времени ядерной спиновой релаксации (десятки секунд) и его резкая зависимость от магнитного поля, не характерные для структур с  $p$ -легированием.

## Благодарность

Работа была выполнена при финансовой поддержке DFG в рамках Международного Центра совместных исследований TRR 160 (проект № A6) и РФФИ (грант № 19-52-12043). МСК благодарит СПбГУ за финансовую поддержку в рамках гранта № ID 91182694.

## Литература

1. R.I. Dzhioev *et al.* // Phys. Rev.B, V. 66, 245204 (2002).
2. G.E. Pikus and A.N. Titkov// *Optical Orientation*, ed. by F. Meier and B. P. Zakharchenya (Amsterdam, North-Holland, 1984, p. 73).
3. G.V. Astakhov *et al.* // Phys. Rev. Lett., V. 101, 076602 (2008).
4. M. Kotur *et al.* // Phys.Rev.B, V. 97, 165206 (2018).



# Экспериментальное и теоретическое исследование легированных бором дельта-слоев осажденного из газовой фазы алмаза для обеспечения высокой подвижности дырок

В.А. Кукушкин<sup>1, 2, \*</sup>, М.А. Лобаев<sup>1</sup>, А.Л. Вихарев<sup>1</sup>, А.М. Горбачёв<sup>1, 2</sup>, Д.Б. Радицев<sup>1</sup>, Е.А. Архипова<sup>1</sup>, М.Н. Дроздов<sup>1</sup>, В.А. Исаев<sup>1</sup>, С.А. Богданов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*vakuk@ipfran.ru

Установлено, что не учитывавшийся ранее эффект увеличения энергии верхней границы валентной зоны в сильно легированном бором и поэтому перешедшим в металлическое состояние дельта-слое в осажденном из газовой фазы (CVD) алмазе приводит к существенному росту глубины потенциальной ямы, создаваемой им для дырок. В результате квантовое проникновение дырок в окружающий нелегированный алмаз, обуславливающие рост их подвижности по сравнению со случаем однородного легирования, становится существенным лишь при толщине дельта-слоя порядка и менее 0,5 нм и степени компенсации, не превышающей 42 %. Современные технологии модулированного легирования CVD алмаза близки к созданию таких слоёв.

Легированные акцепторной примесью бора нанометровые дельта-слои в осажденных из газовой фазы (CVD) чистых плёнках искусственного алмаза создаются с целью увеличения подвижности дырок и, следовательно, быстродействия приборов алмазной электроники, например полевых транзисторов. Данный эффект достигается за счёт квантового проникновения волновых функций дырок из образуемой легированным слоем потенциальной ямы в окружающий его нелегированный алмаз. В результате их рассеяние на находящихся в легированном слое ионизованных атомах бора должно снижаться, а подвижность – возрастать. Поэтому как экспериментальное, так и теоретическое изучение таких слоёв является актуальной задачей современной алмазной электроники.

## Методика эксперимента и расчёта

Легированные бором дельта-слои в нелегированных монокристаллических CVD алмазных плёнках выращивались в оригинальном микроволновом плазмохимическом реакторе с возможностью быстрого изменения состава газовой смеси, разработанном и созданном в ИПФ РАН [1]. В качестве основы использовались предварительно отшлифованные монокристаллические алмазные подложки. Диагностика профиля концентрации атомов бора выполнялась с помощью метода вторичной ионной

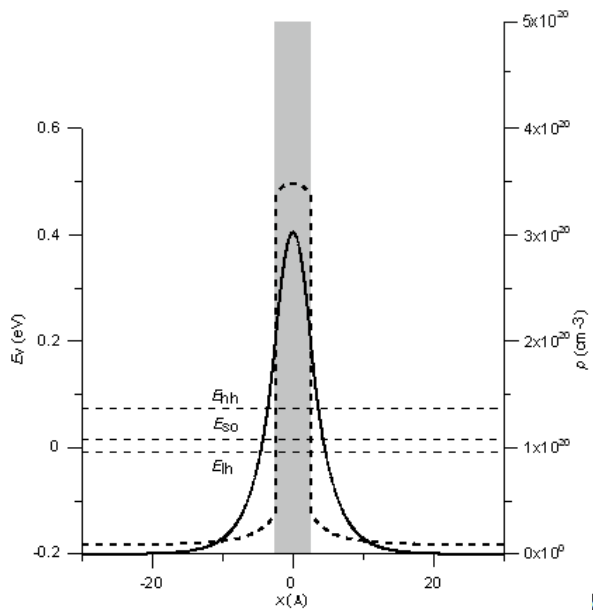
масс-спектрометрии (ВИМС). Подвижность дырок измерялась путём стандартной методики, основанной на эффекте Холла.

Численное моделирование «металлических» дельта-слоёв выполнялось с учётом не принимавшегося ранее во внимание увеличения энергии верхней границы валентной зоны (т.е. уменьшения ширины запрещённой зоны) в них, возникающего вследствие высокой концентрации ионизованных атомов бора. Профили этой энергии, а также концентрации дырок были найдены с помощью метода самосогласованного поля в приближении Хартри путём решения системы уравнений Шредингера (для волновых функций дырок) и Пуассона (для электростатического потенциала). Для этого была использована свободно распространяемая программа «1D Poisson», разработанная Г. Снайдером [2]. Расчёты подвижности дырок, обусловленной рассеянием на ионизованных атомах бора в дельта-слое, выполнялись на основе формул, полученных в [3] в лндхардовском приближении с учётом экранировки.

## Результаты и обсуждение

Нами созданы дельта-слои с малыми толщинами 0,8–2 нм и высокими (обеспечивающими при комнатной температуре фазовый переход в металлическое состояние) концентрациями атомов бора

$(1-1,7) \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Однако существенного увеличения подвижности дырок в таких слоях по сравнению с однородным легированием с той же концентрацией атомов бора зарегистрировано не было. Также оно не было обнаружено и другими исследовательскими группами [4].



**Рис. 1.** Энергия верхней границы валентной зоны  $E_v$  (жирная пунктирная кривая, левая шкала), энергии верхних границ подзон размерного квантования тяжёлых (hh), лёгких (lh) и спин-отщеплённых (so) дырок (горизонтальные тонкие пунктирные линии, левая шкала) и концентрация дырок  $p$  (жирная сплошная линия, правая шкала) для дельта-слоя с толщиной 0,5 нм и концентрацией атомов бора  $N_B = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (серый прямоугольник) при комнатной температуре. Все энергии отсчитываются от уровня химического потенциала

Установлено, что это может быть объяснено не принимавшемся ранее во внимание увеличением энергии верхней границы валентной зоны, возникающим в таких слоях вследствие высокой концентрации ионизованных атомов бора и приводящим к существенному (более чем в 20 раз превышающему тепловую энергию при комнатной температуре) углублению создаваемых ими потенциальных ям для дырок. В результате проникновение волновых функций последних в нелегированный материал, окружающий дельта-слой, оказывается значительно слабее, чем считалось ранее. Так, наши расчёты показывают (рис. 1), что при концентрации атомов бора в дельта-слое порядка  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  и его толщине

2 нм только 7 % (а не 50 % как утверждалось в [5]) дырок находятся вне его, при 1 нм — 19 % (а не 70 % как в [5]) и при 0,5 нм — 47 % (а не 75 % как в [5]). Таким образом, увеличения подвижности дырок в металлических дельта-слоях по сравнению с однородным легированием с той же концентрацией атомов бора можно ожидать лишь при их толщинах порядка и менее 0,5 нм. Это подтверждается расчётами подвижности дырок: в слоях с толщинами 2 и 1 нм она оказывается практически такой же, как и в однородно легированном алмазе с той же концентрацией атомов бора, а в слое с толщиной 0,5 нм — примерно в 2 раза выше. Кроме того, расчёты показали, что в случае компенсации при той же концентрации дырок на единицу площади дельта-слоя, что и в её отсутствии, для сохранения этого увеличения подвижности дырок она не должна превышать примерно 42 %. В противном случае происходящее при компенсации увеличение концентрации ионизованных атомов бора приведёт к углублению потенциальной ямы для дырок, образуемой дельта-слоем, и, как следствие, значительному уменьшению их кантового проникновения в окружающий нелегированный алмаз, а значит, и уменьшению их подвижности.

Таким образом, добиться увеличения подвижности дырок в легированных бором «металлических» дельта-слоях в CVD алмазе можно при их толщинах порядка и менее 0,5 нм и степени компенсации, не превышающей 42 %.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (проект № 0030-2021-0003).

## Литература

1. A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, M.A. Lobaev *et al.* // *Phys. Status Solidi RRL*, V. 10(4), 324 (2016).
2. <https://www3.nd.edu/~gsnider/>
3. В.А. Кукушкин // *ФТП*, Т. 53(10), 1437 (2019).
4. G. Chicot, A. Fiori, P.N. Volpe *et al.* // *J. Appl. Phys.*, V. 116(8), 083702 (2014).
5. A. Fiori, J. Pernot, E. Gheeraert, and E. Bustarret // *Phys. Status Solidi A*, V. 207(9), 2084 (2010).

# Неравновесная динамика экситонных поляритонов в высокодобротных GaAs микрорезонаторах

В.Д. Кулаковский<sup>1</sup>, А.А. Деменев<sup>1</sup>, С.Н. Терешко<sup>1</sup>, Н.А. Гиппиус<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл. 142432 Россия.

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, ИЦ "Сколково", Москва 143026 Россия.

\* kulakovs@issp.ac.ru

Найдено, что эволюция некогерентных экситон-поляритонных систем, резонансно возбуждаемых в планарных полупроводниковых микрорезонаторах пикосекундными световыми импульсами при  $T=2$  К в отсутствие потенциальных барьеров определяется упругим рассеянием поляритонов на потенциале беспорядка, рассеяние поляритонов на фононах на временах  $\sim 1$  нс пренебрежимо мало. Быстрое уменьшение средней кинетической энергии поляритонов в возбуждаемой области вследствие разбегания горячих поляритонов резко замедляется по мере расширения поляритонного газа до размеров порядка длин свободного пробега поляритонов, при этом система остается далекой от равновесной.

## Введение

Экситонные поляритоны в полупроводниковых микрорезонаторах (МР) представляют собой квазичастицы - бозоны, образующиеся при взаимодействии света и экситонов в режиме сильной экситон-фотонной связи. Благодаря очень малой эффективной массе, они демонстрируют когерентные свойства при относительно низких плотностях вплоть до комнатных температур. Большой интерес к поляритонным конденсатам обусловлен несколькими причинами: (i) высокая температура бозеконденсации, (ii) возможность контроля величины поляритон-поляритонного взаимодействия и (iii) возможность формирования неравновесных конденсатов, переходами между которыми можно управлять на масштабе мкм и пс. [1]

При межзонном возбуждении после достижения квантового вырождения основного состояния поляритонов наблюдаются относительно короткие – несколько десятков пс – времена формирования конденсата благодаря бозонной стимуляции рассеяния возбужденных экситонов в это состояние. При этом взаимодействие поляритонов с резервуаром экситонов сильно ограничивает длину пространственной когерентности в конденсате [2].

В чисто поляритонных системах, когда экситонный резервуар отсутствует, времена конденсации сильно возрастают, поэтому исследования этих явлений стали возможны только после появления высокодобротных МР.

В данной работе исследована динамика когерентных свойств поляритонной системы в GaAs МР при

резонансном некогерентном фотовозбуждении не приводящем к возбуждению экситонов.

## Образцы и экспериментальная методика

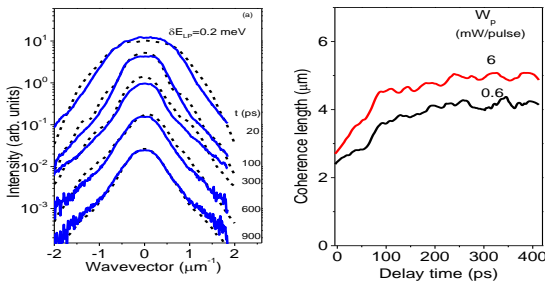
Поляритоны исследовались в  $2\lambda$ -AlAs/GaAs МР структуре с 4 наборами из 3-х In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>As 10-нм квантовых ям, выращенной на GaAs подложке. Большое количество пар AlAs/GaAs в зеркалах Брэгга обеспечивало добротность  $Q > 10^5$ . Расщепление Раби - 7,5 мэВ.

Для возбуждения поляритонов использовался пере-страиваемый Ti-сапфировый лазер. Сходящиеся пучки пикосекундных импульсов с апертурой  $\Delta\theta = 40^\circ$  и спектральной шириной 1.5 мэВ резонансно возбуждали поляритоны с энергией на 4 мэВ ниже энергии экситона с волновыми векторами  $|k| < 2.2$  мкм<sup>-1</sup> в пятне 100x100 мкм<sup>2</sup>. Сигнал детектировался из центральной области 30x30 мкм<sup>2</sup> с помощью стрик-камеры с разрешением 3 пс.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1а показан набор зависимостей  $I(k_x)$ , записанных при некогерентном резонансном возбуждении пикосекундными импульсами, сходящимися в широком диапазоне углов  $|\Theta| \leq 20^\circ$ , на энергии  $\hbar\omega_p = E_{LP}(k=0) + 0,2$  мэВ при  $W_p = 6$  нДж/имп. Возбужденная плотность поляритонов  $n_{LP} = 7 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> определена из измеренной мощности интегрального излучения поляритонов. Распределение поляритонов  $n(k)$  остается сильно неравновесным во всем интервале  $t \leq 1$ нс. Средняя кинетическая энергия

поляритонов  $\langle E_{kin} \rangle$  при  $t < 10$  пс равна  $\approx 0.53$  мэВ, при  $t > 100$  пс она уменьшается до  $\approx 0.33$  мэВ и далее уменьшается очень медленно до  $\approx 0.3$  мэВ при  $t = 200$  пс и  $\approx 0.28$  мэВ при  $t = 1$  нс. Это значение в 1.7 раза превышает  $\langle E_{kin} \rangle$  даже в больцмановском газе с  $T_{LP} = T_{bath} = 2$  К.



**Рис. 1 (а)** Зависимости  $I(k_x)$ , измеренные при разных задержках при некогерентном возбуждении пс импульсами с  $\hbar\omega_p = E_{LP}(k=0) + 0.2$  мэВ, сходящимися в диапазоне углов  $|\theta| \leq 20^\circ$  при  $W_p = 6$  нДж/имп (сплошные линии), и рассчитанные при  $\delta E_{LP} = 0.2$  мэВ (пунктир) **(б)** Зависимости длины когерентности от времени при  $W_p = 6$  и  $0.6$  мВт/имп

Быстрое охлаждение поляритонной системы после окончания импульса возбуждения обусловлено разбеганием высокоэнергетичных поляритонов. Об этом свидетельствует сильно укороченное время затухания,  $\tau$ , интегральной интенсивности излучения поляритонов  $I(t)$  из центральной области пятна при малых  $t$ :  $t < 90$  пс при  $t < 50$  пс и возрастает до 175 пс, в то время как затухания  $I(t)$  из расширенной области с диаметром 350 мкм близко к моноэкспоненциальному со временем  $\tau \approx 170$  пс.

На рис. 1а видно, что полуширина  $I(k)$  на полувысоте  $\Delta k/2 \geq 0.4$  мкм<sup>-1</sup> вплоть до 1 нс, в то время как в отсутствие рассеяния время разбегания поляритонов за пределы 100 микронного пятна  $t_{esc} \sim 100$  м/ħк пс для поляритонов с  $k \sim 0.4$  мкм<sup>-1</sup> меньше 150 пс.

Стабилизацию распределения  $n(k)$  при  $t > 200$  пс естественно связать с упругим рассеянием поляритонов. Измерения временных эволюций  $I(k)$  при отличающихся в 10 раз  $W_p = 6$  и  $0.6$  нДж/имп, показали, что они совпадают с точностью до отношения  $W_p$ . Поэтому даже при  $n = 7 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> влиянием межчастичного рассеяния на динамику поляритонов можно пренебречь и предположить, что упругое рассеяние поляритонов происходит на флуктуациях потенциала, обусловленных флуктуациями ширины InGaAs квантовых ям и концентрации In в них.

Для оценки величины потенциала беспорядка  $\delta E_{LP}$ , необходимой для описания динамики резонансно

возбужденной некогерентной поляритонной системы было проведено моделирование с использованием одномерного уравнения Шрёдингера в случайном потенциале. Несмотря на упрощенное, по сравнению с двумерной картиной в эксперименте, одномерное приближение в расчетах, полученные зависимости воспроизводят основные особенности экспериментально исследованной поляритонной динамики при  $\delta E_{LP} = 0.2$  мэВ (рис. 1а).

Длины пространственной когерентности  $L_c$  в поляритонной системе были определены из измерений пространственной функции когерентности 1-го порядка  $g^{(1)}(r_1, r_2, t_1 = t_2)$  на основе анализа спектров интерференции света из разных точек на образце, измеренных с помощью интерферометра Майкельсона. На рис. 1б видно, что  $L_c$  быстро возрастает только при  $t < 100$  пс, когда происходит быстрое уменьшение  $\Delta k$ , т. е. оно рост пространственной когерентности определяется, в основном, сужением распределения поляритонов в  $k$ -пространстве. На рис. 1б видно, что как скорость нарастания  $L_c$ ,  $v_{coh}$ , при  $W_p = 6$  больше, чем при  $0.6$  нДж/имп. Поскольку скорости сужения  $I(k)$  при этих двух  $W_p$  совпадают, разница в скоростях увеличения  $L_c$  обусловлена взаимодействием поляритонов. Величина взаимодействия  $\Delta E = V n_{LP}$ , где  $V = 10^{-12}$  мэВ/см<sup>2</sup> - константа поляритон-поляритонного взаимодействия. При  $W_p = 6$  нДж/имп  $\Delta E \sim 0.07$  мэВ при  $t = 10$  пс. При задержках  $t > 250$  пс, распределение поляритонов в  $k$ -пространстве стабилизируется, а  $\Delta E$  уменьшается до 7 мкэВ ( $\sim 0.02 \langle E_{kin} \rangle$ )  $L_c$  перестает увеличиваться.

Возникновение пространственной когерентности определяется сужением распределения поляритонов в  $k$ -пространстве, а не образованием конденсатной фазы. Истинный конденсат, т.е. макроскопическое заселение основного состояния с подавленными фазовыми флуктуациями, не достигается.

Авторы выражают благодарность С.С. Гаврилову за плодотворные обсуждения и П. Саввидису за высокодобротные МР структуры. Работа поддержана грантом РФФ 21-12-00368.

## Литература

1. A. V. Kavokin *et al.* // Microcavities (Oxford University Press, Oxford, 2007).
2. A. Askitopoulos, et al, Phys. Rev. B 88, 041308(R) (2013)

# Оптические свойства и фазовый переход в нанокристаллах перовскитов $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$

Е.В. Кулебякина<sup>1,\*</sup>, М.Л. Скориков<sup>1</sup>, Е.В. Колобкова<sup>2,3</sup>, В.В. Белых<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Ленинский пр-т, 53, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Университет ИТМО, Кронверкский пр-т, 49, литер. А, Санкт-Петербург, 197101.

<sup>3</sup> СПбТУ Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251.

\*kulebyakinaev@lebedev.ru

В работе исследованы стационарные спектры фотолюминесценции (ФЛ) и спектрально-временная динамика ФЛ нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$  в матрице фторфосфатного стекла. Обнаружено, что положение линии ФЛ и края пропускания немонотонно зависит от температуры, что, по-видимому, связано со структурным фазовым переходом при 150 К. Динамика ФЛ характеризуется двумя компонентами — быстрой и медленной, что может быть связано с наличием светлого и темного экситонных состояний.

## Введение

В последнее время большое внимание уделяется разработке высокоэффективных солнечных элементов для удовлетворения постоянно растущего спроса на экологически чистую энергию. Перовскиты – материал, оказавшийся довольно перспективным для новых фотоэлектрических устройств, вследствие своих оптоэлектронных свойств, таких как большой коэффициент поглощения света, высокая подвижность носителей, большая длина диффузии и т.д. Среди различных модификаций перовскитов наиболее высокую термическую стабильность проявляют галогенидные перовскиты, что делает их в наибольшей степени подходящими материалами для практических приложений.

## Методика эксперимента

Исследованные в работе нанокристаллы перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$  в матрице фторфосфатного стекла были изготовлены в Санкт-Петербургском Техническом университете [1]. Синтез проводили в закрытом стеклотермодоме при температуре 1000 °С. Около 50 г шихты расплавляли в тигле в течение 20 минут, после чего расплав стекла отливали на стеклотермодомную пластину и прессовали с образованием пластины толщиной ~ 2 мм. Нанокристаллы формировались в результате самокристаллизации во время закалки расплава с последующим их ростом во время термообработки в муфельной печи на воздухе. Образцы помещали в печь, нагретую до требуемой температуры, обрабатывали при 400 - 450 °С в течение 20 – 40 минут с последующим извлечением из горячей печи на воздух. Полученные таким образом нанокристаллы перовскитов

в стеклянной матрице имели размеры в пределах от 4 до 11 нм.

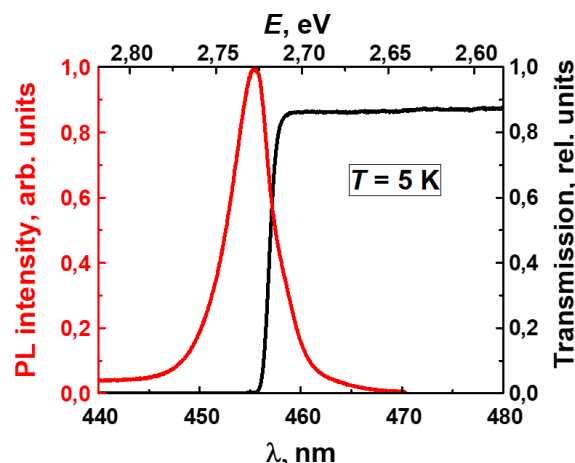


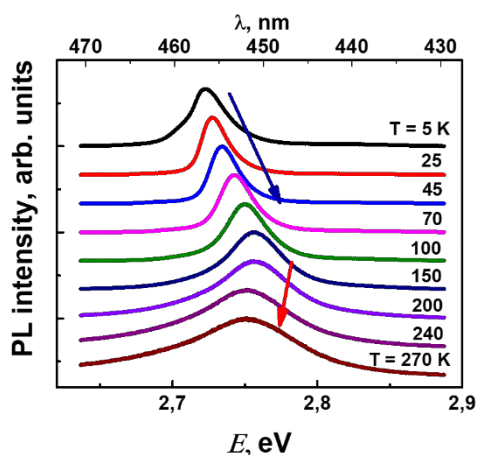
Рис. 1. Спектры ФЛ и пропускания нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$  в матрице фторфосфатного стекла

Исследования оптических свойств данных образцов проводились методом стационарной и время-разрешенной спектроскопии. Для возбуждения сигнала при измерении динамики ФЛ использовалось излучение второй гармоники (400 нм) импульсного титан-сапфирового лазера (частота повторения 76 МГц, длительность импульса 2 пс). При измерении стационарных спектров ФЛ использовался полупроводниковый лазер (405 нм). В случае регистрации спектров стационарной ФЛ использовался решеточный спектрометр Aton SpectraPro 2500, время-разрешенной ФЛ – сверхскоростная электронно-оптическая камера (стрик-камера) Hamamatsu C5680, сопряженная с таким же спектрометром. Для регистрации более медленных кинети-

ческих зависимостей ФЛ частота повторения лазерных импульсов понижалась вплоть до десятков кГц с помощью акустооптического селектора импульсов. Измерения проводились при температурах от 6 К до 272 К, для чего образец помещался в гелиевый оптический криостат с температурным контролем.

## Результаты и обсуждение

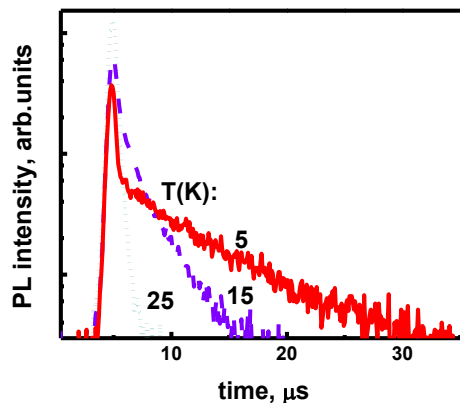
Положение максимума ФЛ и края оптического поглощения для исследуемого образца приходится на длину волны 455 нм (рис. 1). Температурная зависимость стационарных спектров ФЛ в диапазоне от 5 до 270 К представлена на рисунке 2. Видно, что при повышении температуры до 150 К наблюдается синее смещение, за которым следует красное вплоть до комнатных температур. Описываемые особенности в температурной зависимости стационарных спектров ФЛ (рис. 2) по-видимому объясняются структурным фазовым переходом. Согласно литературным данным при температуре около 150 К происходит переход из моноклинной фазы в орторомбическую.



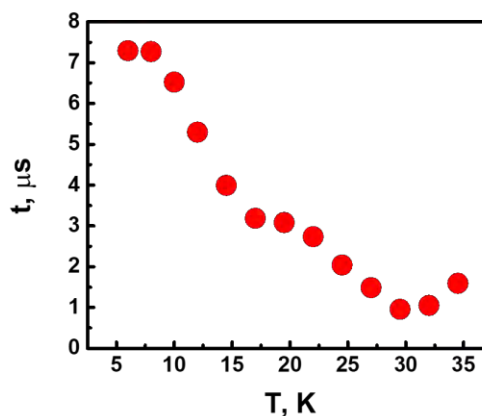
**Рис. 2.** Температурная зависимость стационарных спектров ФЛ нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$  в матрице фторфосфатного стекла

Динамика ФЛ характеризуется двумя компонентами — быстрой и медленной (рис. 3), что может быть связано с наличием светлого и темного экситонных состояний. При этом медленная компонента при низких температурах характеризуется неэкспоненциальным затуханием вплоть до микросекундных времен, что свидетельствует о неоднородности

массива нанокристаллов. С ростом температуры вклад медленной компоненты увеличивается, а время ее затухания уменьшается (рис. 4), что указывает на то, что темное состояние является основным.



**Рис. 3.** Температурная зависимость динамики ФЛ нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$  в матрице фторфосфатного стекла



**Рис. 4.** Температурная зависимость времени затухания медленной компоненты в динамике ФЛ нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$  в матрице фторфосфатного стекла

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-598 в ФИАН.

## Литература

1. E.V. Kolobkova, M.S. Kuznetsova, N.V. Nikonov // *Journal of Non-Crystalline Solids*, V. 563, 120811 (2021).



# Газовые и биосенсоры на основе структур Graphene/SiC

А.А. Лебедев<sup>1, \*</sup>, В.Ю. Давыдов<sup>1, a</sup>, С.П. Лебедев<sup>1, b</sup>, А.Н. Смирнов<sup>1, c</sup>,  
И.А. Елисеев<sup>1, 3, d</sup>, С.Н. Новиков<sup>2, e</sup>, А.С. Усиков<sup>4, 5, f</sup>, Ю.Н. Макаров<sup>4, 5, g</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Политехническая 26, 194021, С.-Петербург.

<sup>2</sup> Aalto University, Tietotie 3, 02150, Espoo, Finland.

<sup>3</sup> Университет ИТМО, С.-Петербург, 197101, Кронвергский проспект 49.

<sup>4</sup> ГК «Нитридные кристаллы», 194156, пр. Энгельса, д. 27, С.-Петербург.

<sup>5</sup> Nitride Crystals Inc., 181 E Industry Court, Suite B, Deer Park, NY 11729, USA.

\*shura.lebe@mail.ioffe.ru, <sup>a</sup>Valery.Davydov@mail.ioffe.ru, <sup>b</sup>lebedev.sergey@mail.ioffe.ru, <sup>c</sup>Alex.Smirnov@mail.ioffe.ru,

<sup>d</sup>zoid95@yandex.ru, <sup>e</sup>sergeyv59@gmail.com, <sup>f</sup>alexander.usikov@nitride-crystals.com, <sup>g</sup>yuri.makarov@nitride-crystals.com.

В настоящей работы рассмотрена технология формирования био-сенсора на основе пленки графена, полученного термодеструкцией поверхности карбида кремния. Проанализированы новые результаты, полученные при детектировании с помощью графенового сенсора различных типов биологических молекул.

## Введение

Открытие графена и исследование его свойств являются одной из наиболее ярких страниц развития физики твердого тела последних 15 лет [1]. Это открытие вызвало появление целого класса двумерных структур, из которых графен по-прежнему является наиболее изучаемым материалом. Использованный К.Новоселовым и А.Геймом в их первой работе по получению и исследованию графена метод exfoliation «отшелушивание», сводится к отделению от кристалла графита чешуйки толщиной в один атом. До сих пор получаемые по этой технологии образцы графена обладают наилучшим структурным совершенством. Именно на этих образцах были получены наиболее важные результаты, подтвердившие двумерный характер данного материала. Но их малые размеры, неправильная и заранее не предсказуемая геометрическая форма не позволяют их использовать в промышленности.

## Технология

Одной из самых перспективных технологий синтеза графена, которая позволяет получать высококачественный материал и в тоже время может быть интегрирована в промышленное производство, является термодеструкция поверхности подложек карбида кремния (SiC) [2,3]. В настоящей работе представлены результаты исследований структурных свойств графеновых пленок, выращенных на полярных Si-границы (ориентация поверхности - (0001) подложки SiC с использованием метода

термического разложения поверхности кристалла. Формирование графена осуществлялось на высокоомных подложках карбида кремния для того, чтобы исключить влияние проводимости подложки при проведении исследований транспортных свойств. Синтез осуществлялся при температуре 1800°C в вакууме и атмосфере инертного газа (Ar). Перед ростом графена проводилось сублимационное травление SiC для удаления дефектного слоя с поверхности. С использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), атомно-силовой микроскопии, получена и проанализирована информация о кристаллической и электронной структуре выращенных графеновых слоев. Показано, что оптимизация ростовых параметров, выполненная по результатам комплексных исследований, позволила создать надежную технологию роста высококачественных графеновых слоев с толщинами в диапазоне 1–2 монослоя. Было проведено исследование транспортных свойств пленок методом эффекта Холла. Величина концентрации носителей заряда в исследуемом графене составила  $7 \times 10^{11} - 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а максимальное значение подвижности электронов приблизилось к  $6000 \text{ см}^2/(\text{В с})$ .

## Разработка сенсоров

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что графен, обладает уникальным набором электрофизических свойств:

- высокой подвижностью носителей заряда в сочетании с их малой концентрацией,

- максимально возможным отношением площади поверхности к объёму,

- низким уровнем шумов/

Сочетание этих характеристик приводит к тому, что присоединение к поверхности графена минимальной концентрации примеси может заметно изменить проводимость графеновой пленки. Таким образом, графен является весьма перспективным материалом для изготовления различных типов сенсоров. В работе группы А.Гейма было показано, что графен способен чувствовать адсорбцию даже одной молекулы. Присоединенные молекулы газа в зависимости от их заряда и типа проводимости графеновой пленки ведут себя как доноры или акцепторы, т. е. изменяют концентрацию подвижных носителей заряда. В результате в зависимости от типа адсорбированной молекулы наблюдалось уменьшение или увеличение проводимости графена. Следует отметить, что одним из серьезных недостатков графенового газового сенсора является отсутствие селективности. Действительно, по изменению проводимости нельзя сказать, какая именно молекула адсорбировалась на поверхность графена. Проблему селективности датчика на основе графена можно решить путем использования реакции антиген–антитело. Компоненты этой пары могут взаимодействовать только друг с другом и ни с какими другими белками. Известно, что на определенных стадиях многих заболеваний человека в крови появляются антигены-маркеры, специфичные для одного или для группы заболеваний. Эти антигены могут взаимодействовать со специфич-

ными антителами, предварительно нанесенными на поверхность графенового сенсора. Реакция, как и в случае газового сенсора, приводит к изменению сопротивления графеновой пленки. Использование пары антиген–антитело позволяет решить проблему селективности биосенсора и открывает очень широкие возможности для использования датчиков на основе графена в медицине и биологии. Этот подход может привести к созданию портативных биосенсоров, способных в режиме экспресс-анализа выявлять в биологических жидкостях диагностически значимые маркеры заболеваний. На основе выращенных пленок графена были изготовлены и протестированы газовые и биосенсоры с рекордной для твердотельных сенсоров чувствительностью [4,5].

## Литература

1. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., et.al. // *Science*, **306**, 666-669, (2004)
2. Yazdi G. R, Iakimov T. and Yakimova R., Epitaxial Graphene on SiC: // *Crystals*, **6**, 53, (2016),
3. I. A. Eliseyev, V. Yu. Davydov, A. N. Smirnov, et.al // *Semiconductors*, Vol. 53, No. 14, pp1904-1909, (2019).
4. S. Novikov, N. Lebedeva, A. Satrapinski, et.al // *Sensors and Actuators B: Chemical* T. **236** – C. 1054-1060, (2016).
5. Lebedev A. A., Davydov S. Yu., Eliseyev I. A., et.al. // *14*, 590, (2021).

# Электронная структура пассивированных поверхностей n-InP(100)

М.В. Лебедев<sup>1,\*</sup>, Т.В. Львова<sup>1</sup>, А.Н. Смирнов<sup>1</sup>, В.Ю. Давыдов<sup>1</sup>, А.В. Королёва<sup>2</sup>,  
Е.В. Жижин<sup>2</sup>, С.В. Лебедев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034.

\*mleb@triat.ioffe.ru

Электронная структура пассивированных сульфидными растворами поверхностей n-InP(100) изучалась с помощью фотолюминесценции, спектроскопии комбинационного рассеяния света, и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Показано, что после пассивации происходит существенное возрастание интенсивности фотолюминесценции. При этом приповерхностная обедненная область полупроводника заметно сужается, в то время как высота приповерхностного барьера практически не изменяется. Таким образом, в этом случае ширина приповерхностной обедненной области пассивированного n-InP(100) больше не пропорциональна квадратному корню высоты приповерхностного барьера вследствие наличия дипольного слоя, обусловленного связями In–S.

## Введение

Фосфид индия (InP) активно используется в электронных и оптоэлектронных приборах. Характеристики современных наноструктурных приборов в существенной степени определяются свойствами поверхностей и интерфейсов. Поверхности полупроводников  $A^3B^5$  химически активны и характеризуются высокой плотностью состояний в запрещенной зоне, приводящих к поверхностной безызлучательной рекомбинации. Поэтому пассивация поверхности необходима для снижения электронных и оптических потерь в наноструктурах, а также для химической стабилизации их поверхности [1].

В данной работе с помощью фотолюминесценции (ФЛ), спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), а также рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) исследуется электронная структура поверхностей n-InP(100), пассивированных различными сульфидными растворами.

## Методика эксперимента

В качестве образцов использовались кристаллы n-InP(100) с уровнем легирования около  $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а также эпитаксиальные слои n-InP(100) с уровнем легирования  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Образцы обрабатывались одним из растворов сульфида аммония ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S), в качестве которых использовались стандартный водный раствор с концентрацией ~44%, а также водный или спиртовой раствор с концентрацией 4%, приготовленный из стандартного путем разбавления водой или изопропиловым спиртом (2РА).

Исследования методами ФЛ и КРС проводились при комнатной температуре на установке Т64000 (Horiba Jobin-Yvon). Спектры возбуждались линией 442 нм He–Cd лазера. Спектры ФЛ и КРС измерялись в одной и той же точке образца. Химический состав и электронная структура образцов анализировались методом РФЭС.

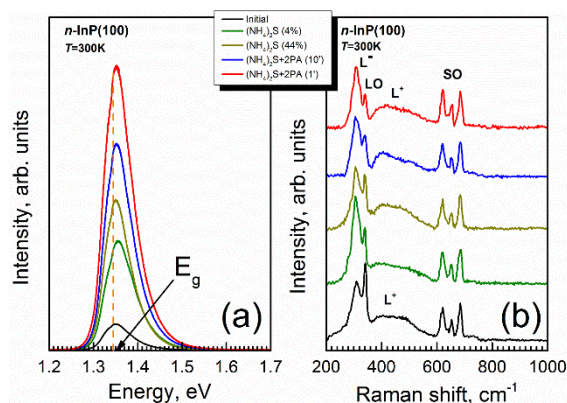


Рис. 1. Спектры ФЛ (а) и КРС (б) поверхности n-InP(100) с уровнем легирования  $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , измеренные до и после пассивации различными сульфидными растворами

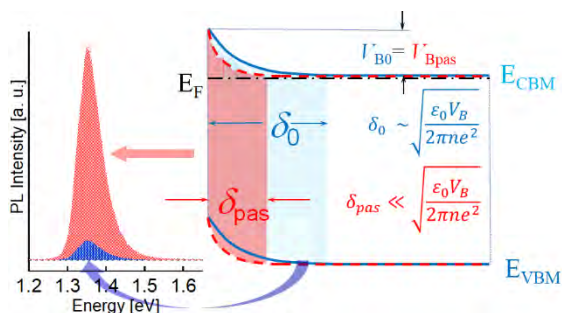
## Результаты

Спектры ФЛ и КРС, измеренные до и после пассивации поверхности n-InP(100) в различных сульфидных растворах, представлены на Рис. 1. Видно, что после сульфидной обработки интенсивность ФЛ существенно возрастает (Рис. 1а). Одновременно в спектрах КРС наблюдается уменьшение отношения интенсивностей пиков LO и L<sup>-</sup> (Рис. 1б), что свидетельствует об уменьшении ширины приповерхностной обедненной области полупроводника. При этом

возрастание интенсивности ФЛ и отношение интенсивностей пиков LO и L<sup>-</sup> зависят от состава сульфидного раствора.

Пассивация n-InP(100) с уровнем легирования  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  вызывала существенно меньшее возрастание интенсивности ФЛ. Так, после обработки в спиртовом растворе в течение 2 мин интенсивность ФЛ возрастала примерно на 20%, а не в разы, как в случае слаболегированного n-InP(100), в то время как отношение интенсивностей пиков LO и L<sup>-</sup> в спектрах КРС также уменьшалось.

Данные РФЭС свидетельствуют об удалении слоя фосфатов и оксидов индия и формировании связей In-S после сульфидной обработки n-InP(100), однако величина приповерхностного барьера практически не изменяется. То есть, ширина приповерхностной обедненной области n-InP(100) перестает быть пропорциональной квадратному корню величины приповерхностного барьера (Рис. 2).

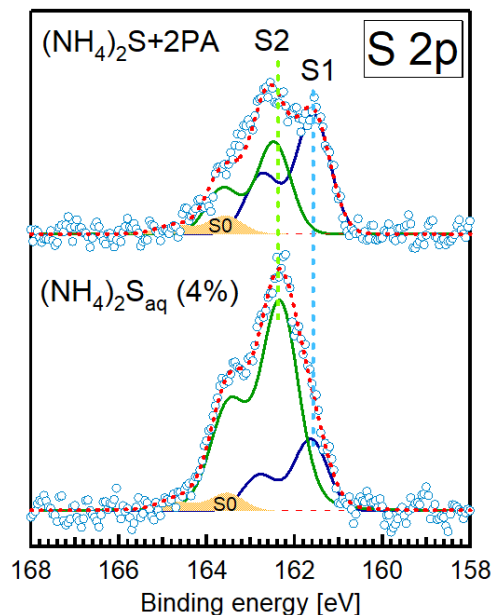


**Рис. 2.** Энергетическая диаграмма поверхности n-InP(100) и соответствующие спектры ФЛ до и после пассивации

Таким образом, общий приповерхностный барьер будет суперпозицией изгиба зон и потенциалов интерфейсных диполей, связанных с химическими связями In-S. При этом суммарный дипольный момент, обусловленный связями In-S, зависит от состава сульфидного раствора, что проявляется в зависимости ширины обедненной области от состава сульфидного раствора.

Для выяснения причин зависимости суммарного дипольного момента связей In-S от состава сульфидного раствора было произведено разложение спектров основных уровней S 2p, измеренных после обработки поверхности n-InP(100) в различных сульфидных растворах. Спектры S 2p могут быть разложены на три компонента S1, S2 и S0 (Рис. 3), обусловленные, соответственно, серой в поверхностных мостиковых связях In-S-In, серой в вакансиях

фосфора, а также избыточной серой [2]. Соотношение компонент S1/S2 изменяется после обработки в различных растворах (Рис. 3), что свидетельствует о зависимости атомной структуры поверхностного сульфидного слоя от состава сульфидного раствора.



**Рис. 3.** Примеры разложения спектров основных уровней S 2p, измеренных на поверхностях n-InP(100), обработанных водным и спиртовым раствором  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  с концентрацией 4% в течение 10 мин

Состояния S1 и S2 должны характеризоваться различными дипольными моментами связей In-S-In, да еще и направленными в противоположные стороны. Соответственно, суммарный дипольный момент сульфидного покрытия будет зависеть от соотношения количества атомов серы в состояниях S1 и S2.

Таким образом, эффективность электронной пассивации n-InP(100) определяется формой приповерхностного потенциала, связанной со спектром поверхностных состояний и величиной приповерхностного диполя. Варьирование сульфидного раствора открывает возможности для контроля электронной структуры поверхности InP.

Данная работа была частично поддержана РФФИ (проект № 20-03-00523).

## Литература

1. P.R. Narangan, J.D. Butson, H.H. Tan, C. Jagadish, S. Karuturi. // Nano Letters, V. 21, 6967 (2021).
2. D.H. van Dorp, L. Nyns, D. Cuypers, *et al.* // ACS Appl. Electron. Mater., V. 1, 2190 (2019).

# Влияние особенностей конструкции диодных оптоэлектронных пар на стойкость к гамма-нейтронному излучению

А.Е. Лебединская<sup>1</sup>, Ю.А. Кабальнов<sup>1</sup>, А.Н. Труфанов<sup>1</sup>, С.В. Оболенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ул. Тропинина, д. 47, Нижний Новгород, 603137.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603022.

\*anastasia\_le@mail.ru

Представлены результаты практической реализации оптронов, функционально объединяющих оптически связанные источник и приемник излучения, при условии электрической изоляции входа и выхода сигналов. В оптронах использованы светоизлучающие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур арсенида галлия- алюминия и фотоприемные устройства на основе структур «кремний на сапфире, собранных в металлокерамический корпус. Представлены результаты измерения основных электрических параметров оптронов, а также результаты испытаний на стойкость к гамма - нейтронному излучению. Результаты испытаний показали уровень стойкости, соответствующий требованиям к радиационно-стойкой аппаратуре систем управления и связи.

## Введение

Разработка оптоэлектронных приборов для бортовой аппаратуры является перспективным направлением развития оптоэлектроники [1]. Оптоэлектронные устройства, содержащие в цепи сигнала оптические звенья, обеспечивают электромагнитную совместимость отдельных узлов бортовой аппаратуры, возможность согласования цифровых устройств выполненных на различной элементной базе, помехозащищенность каналов связи. Серийно выпускаемым оптоэлектронным устройствам присущи недостатки, связанные с низкой стойкостью к воздействию ионизирующего излучения. Перед разработчиками стояла цель создания оптрона, устойчивого в гамма-нейтронному излучению. Устройства развязки на базе фототранзисторов более чувствительны к радиации, чем соответствующие устройства на базе фотодиодов, поэтому была выбрана диодная конструкция, состоящая из арсенид-галлиевого излучателя и фотоприемного устройства, выполненного по технологии КНС. Эксплуатация в условиях воздействия факторов ионизирующего излучения, обуславливала ряд специфических требований к конструкции и технологии изготовления оптоэлектронных устройств.

## Особенности конструкции. Методы выбора источника и приемника оптического излучения

К фотоприемникам, используемым в оптоэлектронных приборах, предъявляются требования по

согласованию спектральных характеристик с источником излучения, минимальным потерям при преобразовании светового сигнала в электрический, фоточувствительности, быстродействию, размерам фоточувствительной площадки, обеспечению надежности и уровню шумов. Фотодиоды должны обеспечивать высокие обратные напряжения и иметь малую величину паразитных параметров, в том числе темновой ток и паразитную емкость. Для эффективной работы оптрона необходимо иметь широкий динамический диапазон входных токов, в котором квантовая эффективность светодиода и коэффициент передачи по току оптрона постоянны. Только при таком сочетании параметров светодиод может быть согласован с фотоприемником и характеристики оптрона будут оптимальны.

К оптической среде предъявляются наиболее жесткие требования, она напрямую влияет на основные характеристики оптрона. Иммерсионная среда должна иметь изоляционные свойства, минимизировать френелевские потери, быть устойчивым в диапазоне температур от минус 80<sup>0</sup> С до 200<sup>0</sup> С. При воздействии ионизирующего излучения в диэлектрических веществах формируются центры окраски, что обуславливает появление дополнительных полос поглощения. В результате прозрачные диэлектрики темнеют и могут окрашиваться в различные цвета.

## Результаты разработки

В оптроне в качестве светодиодов использовались структуры с гетероэпитаксиальными слоями арсе-



нида галлия- алюминия р<sup>+</sup>-р-n-n<sup>+</sup> типа проводимости. Достоинство соединения арсенид галлия - алюминия заключается в возможности получения гетероэпитаксиальных структур с высоким качеством, с малым рассогласованием постоянных решетки, при достаточно широком диапазоне изменения состава. Радиационная стойкость светодиода определяется толщиной активных слоев гетероструктур и процентным содержанием компонент. Для повышения радиационной стойкости светодиодов пластины с гетероэпитаксиальными слоями утонялись до суммарной толщины ~150мкм.

Основой конструкции и технологии изготовления фотодиодов являются структуры «кремний на сапфире», что и определяет их стойкость к ионизирующему излучению. Для выбора оптимальной конструкции, с использованием физико - топологической модели в квазигидродинамическом приближении, моделировались процессы транспорта электронов в структурах фотодиодов. Решались уравнения Пуассона, непрерывности, а также учитывались выражения для плотности тока электронов и дырок [2,3]. Генерированные оптическим излучением носители заряда, под действием электрического поля и диффузии, заполняют слой кремния до границы раздела кремний - сапфир. За счет снижения объема области заполнения, снижалась скорость захвата носителей заряда радиационными дефектами и повышался уровень радиационной стойкости КНС фотодиодов.

Толщина гетероэпитаксиальных пленок кремния (~5мкм) КНС структур выбиралась из расчета величины области поглощения оптического излучения. Режимы проведения технологических операций моделировались с использованием технологической САПР TCAD. Получено оптимальное сочетание соотношения параметров ионной имплантации и высокотемпературного отжига, достигнуты требуемые величины темного тока фотодиодов (~1мкА) и токовой чувствительности (не менее 0,3А/Вт). Для снижения напряжений в структурах кристаллов и уменьшения площади контакта пленки с сапфиром, по периметру фоточувствительных областей на всю глубину эпитаксиального слоя вытравливались канавки. Напряжения обусловлены кривизной КНС структур, вследствие различных термических коэффициентов линейного расширения кремния и сапфира, конструктивное исполне-

ние и габаритные размеры кристаллов светодиодов позволили провести сборку в составе оптоэлектронной пары в металлокерамический корпус. Использовалась так называемая вертикальная схема расположения кристаллов

Стойкость оптоэлектронных пар к воздействию ионизирующего излучения, исследовалась на моделирующих установках, а также с использованием имитационного оборудования. Наибольшие изменения параметров при дозовых нагрузках связаны с ростом величины темного тока (I<sub>t</sub>) фотодиодов (рисунок 1). Однако увеличение I<sub>t</sub> не являлось критичным для функционирования оптоэлектронных пар. Снижение коэффициента передачи тока (К) при максимальных дозовых нагрузках составляло величину не более 5%.

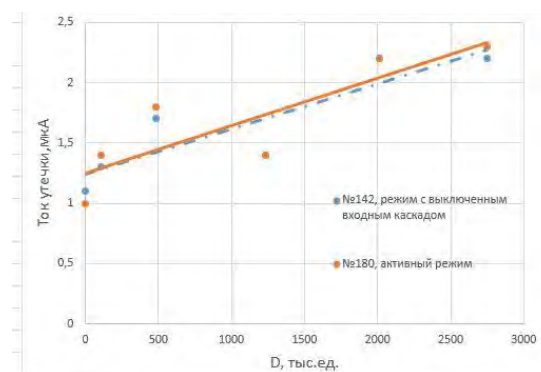


Рис. 1. Зависимость изменения тока утечки фотодиода при воздействии изотопного источника <sup>60</sup>Со

По результатам проведения радиационных испытаний был подтвержден высокий уровень стойкости оптоэлектронных пар к  $\gamma$ -нейтронному излучению.

## Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды // М.: Физматкнига, 2011, 215 с.
2. Кайдалов С.А. Фоточувствительные приборы и их применение // М.: Радио и связь, 1995, 120 с.
3. В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем (М., Энергоатомиздат, 1988).
4. С.В. Оболенский. Изв. вузов. Электроника, 6, 3138 (2002).



# Проводящие свойства интерфейса между сегнетоэлектриком и диэлектриком гетероструктур $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$

А.В. Леонтьев, А.О. Чибирев, Н.Н. Гарифьянов, Р.Ф. Мамин\*

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Сибирский тракт 10/7, Казань, 420029.

\*mamin@kfti.knc.ru

Исследовано влияние света с различной длиной волны на электрическое сопротивление гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$ . В диапазоне 80-200 К освещение вызывает возрастание сопротивления с характерным временем ~4 – 15 с. Отрицательный эффект фотопроводимости зарегистрирован при облучении инфракрасным, зеленым и ультрафиолетовым светом. Наибольший эффект наблюдается при облучении зеленым светом.

## Введение

Интенсивные исследования проводимости интерфейсов гетероструктур на основе двух непроводящих оксидов начались после обнаружения электронного газа высокой подвижности на интерфейсе  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  (LAO/STO) в 2004 году [1]. После этого подобные гетероструктуры всесторонне исследовались, и было выяснено, что металлическая фаза толщиной порядка нанометров в слоях STO на интерфейсе LAO/STO образуется тогда, когда количество слоев LAO больше трёх [2], и также происходит переход в сверхпроводящее состояние при температурах ниже 300 мК [3]. Плотность носителей тока в такой гетероструктуре достигает  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>2</sup>. В LAO/STO был обнаружен ферромагнетизм [4]. Также, двумерный электронный газ был найден на интерфейсах с изоляторами Мотта, обладающими магнитным упорядочением, в частности, с ферромагнитным  $\text{GdTiO}_3$  [5], а также на интерфейсе с антиферромагнитными  $\text{SmTiO}_3$  [6],  $\text{LaTiO}_3$  [7], с максимально возможной плотностью  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>2</sup>. Нами были проведены исследования и обнаружена высокопроводящая область на интерфейсе гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  [8]. В последующем нами были получены результаты по ab initio моделированию гетероструктуры  $\text{BaTiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$ , получены параметры плотности состояний различных слоев вблизи интерфейса. Анализ этих результатов позволил сделать вывод, что на интерфейсе такой гетероструктуры возможно возникновение сверхпроводящего состояния при достаточно высоких температурах. И удалось создать гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$  и обнаружить сверхпроводящее состояние на интерфейсе такой гетероструктуры [9]. В данной работе мы представляем

новые результаты экспериментально исследования влияния освещения на сопротивление гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  (BSTO/LMO).

## Результаты

Гетероструктуры BSTO/LMO были получены двух видов: путем нанесения эпитаксиальной пленки сегнетоэлектрика BSTO на поверхность монокристаллов LMO, и путем последовательного нанесения эпитаксиальных пленок BSTO и LMO на подложку MgO. Основные результаты по фотопроводимости получены для первого случая с использовались пленки толщиной 350 нм. Пленки BSTO находились в сегнетоэлектрическом состоянии при температуре ниже комнатной. Сопротивление интерфейса измерялось по стандартной четырехконтактной методике без освещения и при освещении инфракрасным, зеленым и ультрафиолетовым светом со стороны сегнетоэлектрической пленки.

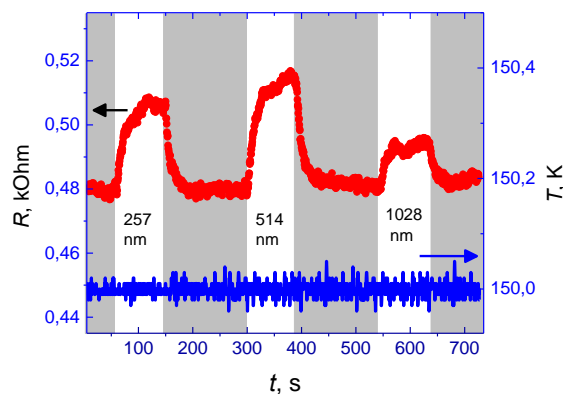
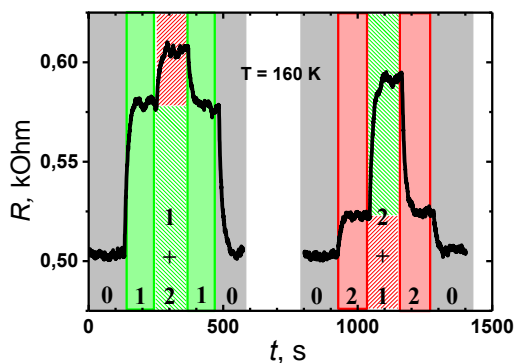


Рис. 1. Зависимость сопротивления гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  от времени при ультрафиолетовом, зеленом и инфракрасном освещении при 150 К



**Рис. 2.** Изменение сопротивления гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  в течение нескольких циклов включения/выключения зеленого и инфракрасного излучения при температуре 160 K

Была исследована динамика фотоотклика с временным разрешением, периодически включая и выключая облучающий гетероструктуру лазер и регистрируя изменения сигнала. Измерялось сопротивление образца между внутренними контактными площадками. При освещении наблюдается увеличение электрического сопротивления гетероструктуры BSTO/LMO. Отрицательный эффект фотопроводимости обнаружен при облучении инфракрасным, зеленым и ультрафиолетовым светом (см. Рис. 1). Наибольший эффект наблюдается при облучении зеленым светом. Эффект не связан с нагревом образца, потому что используется несфокусированный лазерный луч, и поэтому плотность мощности сравнительно мала. Было обнаружено, что при освещении светом разной длины волны наблюдается кумулятивный эффект. При разной последовательности включения/выключения зеленого и инфракрасного освещения наблюдается разный кумулятивный эффект (Рис. 2). В первом случае кумулятивный эффект был больше примерно на 23%, чем во втором. То есть, при одной и той же интенсивности облучения одновременно зеленым и инфракрасным светом эффект зависит от последовательности включения света с различными длинами волн. Следовательно эффект не связан с суммарной поглощенной энергией, что подтверждает отсутствия нагрева. Максимальный вклад в накопленный эффект вносит освещение зеленым светом. Наблюдаемый эффект может быть объяснен возникновением дополнительного внутреннего экранирования поляризации носителями тока, возникающими при освещении. Основные результаты этих исследований недавно опубликованы в работе [10].

## Заключение

При включении освещения электрическое сопротивление гетероструктуры начинает расти с характерным временем  $\sim 4 - 15$  с, а затем достигает установившегося значения при продолжающемся освещении образца. Такое поведение кардинально отличается от обычной фотопроводимости в полупроводниках, где вклад фотовозбужденных носителей увеличивает проводимость. Таким образом, показано, что квазидвумерное высокопроводящее состояние на интерфейсе гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  можно изменять освещением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00179).

## Литература

1. A. Ohtomo and H. Y. Hwang, *Nature* 427, 423 (2004).
2. S. Thiel, G. Hammerl, A. Schmehl, C. W. Schneider, and J. Mannhart, *Science* 313, 1942 (2006).
3. N. Reyren, S. Thiel, A. D. Caviglia, L. Fitting Kourkoutis, G. Hammerl, C. Richter, C. W. Schneider, T. Kopp, A.-S. Ruettschi, D. Jaccard, M. Gabay, D. A. Muller, J.-M. Triscone, and J. Mannhart, *Science* 317, 1196 (2007).
4. A. Brinkman, M. Huijben, M. Van Zalk, J. Huijben, U. Zeitler, J. C. Maan, W. G. van der Wiel, G. Rijnders, D. H. A. Blank, and H. Hilgenkamp, *Nature Mater.* 6, 493 (2007).
5. P. Moetakef, T. A. Cain, D. G. Ouellette, J. Y. Zhang, D. O. Klenov, A. Janotti, Ch. G. Van de Walle, S. Rajan, S. J. Allen, and S. Stemmer, *Appl. Phys. Lett.* 99, 232116 (2011).
6. C. A. Jackson and S. Stemmer, *Phys. Rev. B* 88, 180403 (2013).
7. J. Biscaras, N. Bergeal, A. Kushwaha, T. Wolf, A. Rastogi, R. C. Budhani, and J. Lesueur, *Nature Communications* 1, 89 (2010).
8. Д. П. Павлов, И. И. Пиянзина, В. М. Мухортов, А. М. Балбашов, Д. А. Таюрский, И. А. Гарифуллин, Р. Ф. Мамин, *Письма в ЖЭТФ*, том 106, вып. 7, с. 440 – 444 (2017).
9. D. P. Pavlov, R. R. Zagidullin, V. M. Mukhortov, V. V. Kabanov, T. Adachi, T. Kawamata, Y. Koike, and R. F. Mamin, *Physical Review Letters* 122, 237001x (2019).
10. А. В. Леонтьев, А. О. Чибирев, И. А. Гарифуллин, Р. Ф. Мамин, *Письма в ЖЭТФ*, том 114, вып. 12, с. 818 – 823 (2021).

# Проявление квадрупольных взаимодействий в спектрах радиочастотного поглощения объемных кристаллов n-GaAs

В.М. Литвяк<sup>1,\*</sup>, Р.В. Чербуни<sup>1</sup>, В.К. Калевич<sup>1,2</sup>, А.И. Лихачев<sup>2</sup>, А.В. Нащекин<sup>2</sup>, М. Владимиров<sup>3</sup>, К.В. Кавокин<sup>1</sup>

1 Лаборатория Оптики Спинов им. И. Н. Уральной, СПбГУ, ул. Ульяновская, 1, Санкт-Петербург, 198504.

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

3 Лаборатория Шарля Кулона, Национальный Центр Научных Исследований, Университет Монпелье, пл. Эжен Батайон, Монпелье, 34095 Франция.

\*valiok.ok@gmail.com

Экспериментально получены спектры поглощения оптически охлажденных ядерных спинов объемного кристалла n-GaAs. Спектры поглощения были измерены в четырех различных конфигурациях переменного и статического магнитных полей. В каждой из конфигураций эволюция пиков поглощения с ростом статического магнитного поля была своя. Для описания полученных спектров поглощения была разработана теоретическая модель, позволяющая определить частоты переходов между ядерными спиновыми уровнями. Энергии этих переходов зависят от величины квадрупольного взаимодействия. Из сравнения расчетных и экспериментально зарегистрированных спектров поглощения были определены тип и величина квадрупольного взаимодействия в изучаемом образце.

## Введение

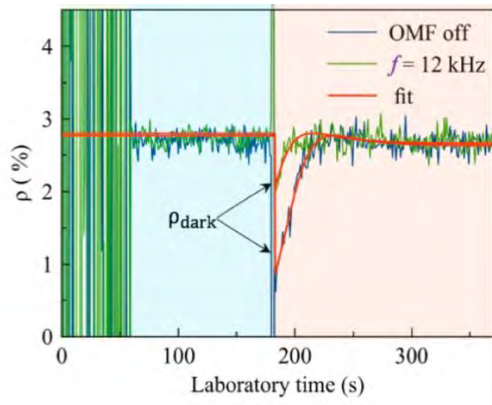
Ядра решетки большинства полупроводников обладают ненулевыми магнитными моментами, которые взаимодействуют между собой через диполь-дипольное взаимодействие и слабо взаимодействуют с колебаниями решетки. В арсениде галлия скорость диполь-дипольного и спин-решеточного взаимодействий ядер могут отличаться на шесть порядков [1], что позволяет понижать температуру ядерной спиновой системы (ЯСС) до нескольких микрокельвин. Это возможно сделать методом оптического охлаждения с дальнейшим адиабатическим размагничиванием в локальное поле  $B_L$ , которое определяется как спин-спиновыми, так и квадрупольными взаимодействиями. Квадрупольные эффекты проявляются в спектрах поглощения в нулевом и в статических магнитных полях как дополнительные пики поглощения, эволюция которых с ростом статического поля зависит от типа и величины квадрупольного взаимодействия.

## Методика эксперимента

Для получения спектров поглощения был использован пятистадийный экспериментальный протокол. Такие пятистадийные эксперименты необходимо проводить для каждой частоты переменного поля при фиксированном статическом поле, чтобы получить один спектр поглощения. Первый этап протокола состоял в подготовке ЯСС в состояние равно-

весия с решеткой. Для этого ЯСС находилась в нулевом магнитном поле в отсутствие накачки в течение минуты. Далее на втором этапе шло оптическое охлаждение ядерных спинов: в течение двух минут образец накачивался циркулярно-поляризованным светом во внешнем продольном магнитном поле  $B_Z = 100$  Гс. Третьим этапом шло адиабатическое размагничивание в локальное поле: продольное поле  $B_Z$  выключалось до нуля за 20 мс. После этого ядерная спиновая температура составляла около 300 мК. На четвертом этапе к охлажденной ЯСС прикладывалось переменное магнитное поле в темноте в течение трех секунд на заданной частоте в заданном статическом магнитном поле. На последнем этапе измерялось, как изменилась спиновая температура под действием переменного магнитного поля. Для этого включалась накачка и поперечное магнитное поле  $B_x \leq B_L$ . В течение всех этапов детектировалась степень поляризации фотолуминесценции. В качестве примера, пятистадийная кривая, измеренная в нулевом статическом магнитном поле для частоты переменного поля  $f = 12$  кГц, показана на рисунке 1 синей линией.

Кривая в отсутствие переменного поля (OMF off) показана на рисунке 1 зеленой линией. Разница в изменении степени поляризации в момент начала последней стадии ( $\rho_{dark}$ ) для двух данных кривых показывает эффективность отогрева ЯСС на частоте 12 кГц.



**Рис. 1.** Пример пятистадийных экспериментальных кривых (зеленая и синяя кривые) и их подгонка по формуле (1) (красные кривые). OMF – oscillating magnetic field

Для того, чтобы извлечь из пятистадийных кривых величину ядерного поля  $B_N$ , оставшегося после отогрева ЯСС переменным полем, последний этап каждой кривой подгонялся формулой 1 (красные кривые на рисунке 1):

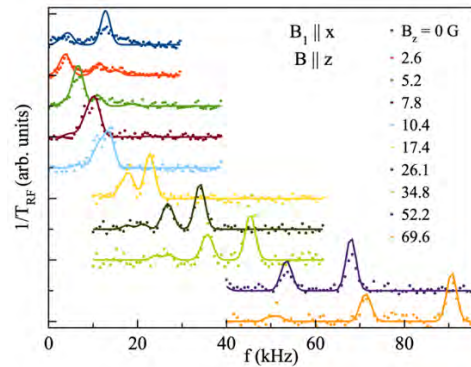
$$\rho(t) = \rho_0 \frac{B_{1/2}^2}{B_{1/2}^2 + (B_x + b + (B_N - b) \exp(-\frac{t}{T_1}))^2}, \quad (\text{ф1})$$

где  $\rho_0$  – степень поляризации на этапе охлаждения,  $B_{1/2}$  – полуширина кривой Ханле,  $T_1$  – время спинрешеточной релаксации ядерных спинов,  $b$  учитывает поляризацию ЯСС на измерительном этапе.

Обработав таким образом каждую кривую, измеренную для определенной частоты  $f$ , мы извлекали ядерные поля  $B_N(f)$ . Сопоставление их полем  $B_N$  в отсутствие высокочастотного воздействия (кривая OMF off на Рис.1) позволяло рассчитать скорость отогрева как функцию частоты.

## Результаты

С помощью описанной выше методики были измерены спектры поглощения охлажденной ЯСС объемного кристалла n-GaAs с концентрацией донорной примеси  $n_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в четырех различных экспериментальных конфигурациях: в двух продольных (переменное и статическое поля были параллельно друг другу) и в двух поперечных (переменное и статическое поля были перпендикулярны друг другу). Всего было получено 35 спектров поглощения. Пример спектров в одной из поперечных конфигураций (когда статическое поле направлено вдоль оптической оси:  $B \parallel z$ , а переменное перпендикулярно ему:  $B_1 \parallel x$ ) приведен на рисунке 2 цветными точками.



**Рис. 2.** Спектры поглощения охлажденной ЯСС, измеренные в поперечной конфигурации эксперимента

Для объяснения природы наблюдаемых пиков поглощения в измеренных спектрах нами была предложена теоретическая модель, которая основывается на расчете собственных значений и собственных функций Гамильтониана ядерных спинов. Гамильтониан состоит из Зеемановской и квадрупольной частей. При этом квадрупольная часть учитывает все возможные источники деформации в образце, а также наличие встроенного электрического поля. Описав весь ансамбль спектров поглощения теоретической моделью (цветные линии на рисунке 2), мы нашли, что квадрупольные эффекты вызваны только деформацией в образце. Дополнительный анализ образца на электронном микроскопе показал, что встроенного электрического поля нет. Однако, чтобы описать спектры поглощения без поля, было необходимо использовать компоненту тензора  $S_{44} = (17 \pm 3) \times 10^{21} \text{ В/м}^2$  [2] вместо  $S_{44} = 48 \times 10^{21} \text{ В/м}^2$  [3].

## Литература

1. Оптическая ориентация под ред. Б.П. Захарченя, Ф. Майер, глава 5 (1989).
2. V.M. Litvyak, R. V. Cherbunin *et. al.* // Physical Review B, V. 104, 235201 (2021).
3. E. A. Chekhovich, I. M. Griffiths *et. al.* // Physical Review B, V. 97, 235311 (2018).

## Благодарности

Авторы работы выражают благодарность проекту РНФ № 22-42-09020.

# Влияние температуры роста на стимулированное излучение в ИК диапазоне InGaN слоев, полученных методом МПЭ ПА

Д.Н. Лобанов\*, Б.А. Андреев, К.Е. Кудрявцев, Л.В. Красильникова, П.А. Юнин, Е.В. Скороходов, М.А. Калинин, А.В. Новиков, З.Ф. Красильник

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*dima@ipmras.ru

В работе представлены исследования стимулированного излучения в ближней инфракрасной области от слоев InGaN с содержанием [In] ~ 80%, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией, и влияние температуры роста в диапазоне 430-510 °С на порог генерации. Наименьший порог генерации наблюдался для InGaN слоев, выращенных при 470-480 С, и составил < 10 кВт/см<sup>2</sup> при 77 К. Экспериментальные данные свидетельствуют о двухслойной модели InGaN с дефектным интерфейсным слоем и относительно чистым объемом InGaN, ответственным за излучение света.

На настоящий момент потенциал структур на базе III-нитридов (AlN, GaN, InN и их тройных соединений) реализован в достаточной мере лишь в ультрафиолетовой и сине-зеленой областях спектра для GaN, AlGaN и InGaN с малой долей In. Попытки сформировать планарные структуры с содержанием [In] > 50%, что необходимо для продвижения в видимую красную и ИК области спектра, приводят к существенной деградации кристаллического качества и, как следствие, падением внутренней и внешней квантовых эффективностей излучения. Авторами настоящей работы недавно было продемонстрировано стимулированное излучение в ИК диапазоне длин волн 1.1-1.65 мкм из планарных слоев InGaN с долей [In] > 75%, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) на сапфировых подложках с буферными слоями GaN/AlN [1]. Было показано, что параметры стимулированного излучения (длина волны и пороговая мощность) существенным образом зависят от структурного качества InGaN слоев, шероховатости их поверхности и фоновой концентрации электронов, которые определяются условиями их роста.

В работе представлены результаты исследования роста InGaN слоев с содержанием [In] ~ 80% на GaN/AlN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при разных температурах роста.

Проведён анализ спектров фотолюминесценции, структурных и транспортных свойств InGaN слоев, полученных в разных условиях, а также влияние этих характеристик на порог стимулированного излучения в таких структурах.

## Эксперимент

Рост слоев InGaN проводился на подложках c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом МПЭ ПА на установке STE 3N3 (ЗАО "НТО"). На Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> подложках последовательно выращивались высокотемпературные буферные слои AlN (200 нм) и GaN (700 нм). Далее температура роста понижалась до 430°C - 510°C, при которой осуществлялся рост слоя InGaN с содержанием [In] ~ 80 % в азотобогатённых условиях при соотношении потоков III/V ~ 0.85. Выращенные образцы исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгенодифракционного анализа (РД), фотолюминесценции (ФЛ), спектроскопии отражения и пропускания, эффекта Холла. Эксперименты по наблюдению стимулированного излучения (СИ) проводились в однопроходном режиме [1].

## Результаты и обсуждение

Исследования образцов методами РД показали, что с увеличением температуры роста происходит сужение РД пика от InGaN слоев (рис. 1а) и, соответственно, уменьшение плотности прорастающих дислокаций (рис. 1б), что говорит о возрастающем структурном совершенстве InGaN слоев. Однако, в образце с InGaN, выращенном при самой высокой из исследованных температур ( $T_g = 510^\circ\text{C}$ ), наряду с доминирующим пиком от InGaN наблюдаются сигналы от InGaN с меньшим содержанием [In], InN и даже металлического In. Наличие в спектре рентгеновского отражения сигналов от этих фаз говорит о начале спинодального распада. Согласно исследованиям образцов методом Холла было обнаружено

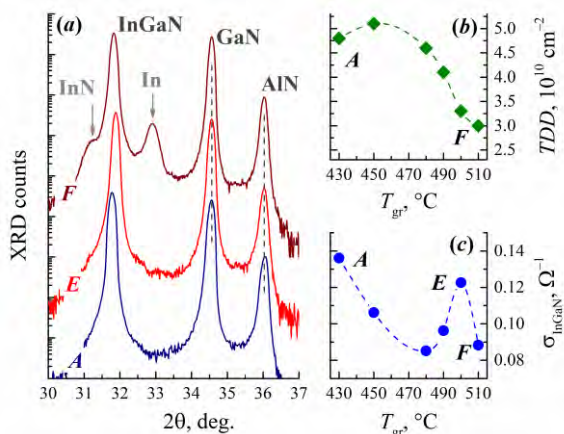


немонотонное поведение проводимости слоёв с увеличением температуры роста (рис. 1с).

**Таблица 1.** Основные параметры исследованных образцов: температура роста InGaN ( $T_{gr}$ ), плотность прорастающих дислокаций (TDD) и проводимость слоя InGaN ( $\sigma_{InGaN}$ )

Образец	$T_{gr}, ^\circ\text{C}$	TDD, $10^{10} \text{ cm}^{-2}$	$\sigma_{InGaN}, \Omega^{-1}$
A	430	4.8	0.136
B	450	5.1	0.106
C	480	4.6	0.085
D	490	4.1	0.096
E	500	3.3	0.122
F	510	3.0	0.088

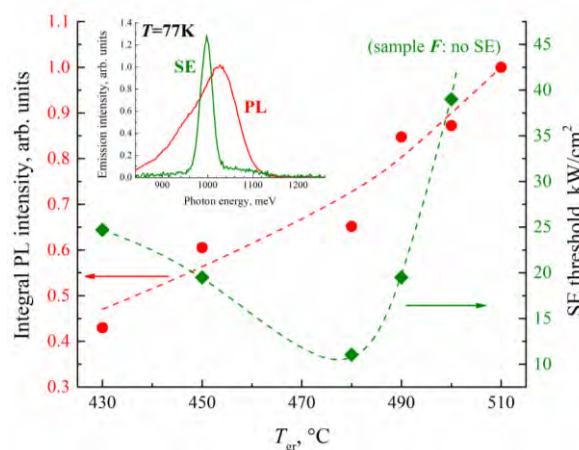
Качественно, такая зависимость при увеличении  $T_g$  до  $480^\circ\text{C}$  может быть связана со снижением фоновой концентрации электронов ( $n_e$ ) при улучшении кристаллического качества InGaN слоёв.



**Рис. 1.** (0004)  $\omega$ -2 $\theta$  спектры рентгеновской дифракции образцов с InGaN слоями, выращенными при разных температурах (а). Плотность прорастающих дислокаций в InGaN слоях, вычисленная на основе РД данных (б). Проводимость InGaN слоёв, полученная из экспериментов по измерению эффекта Холла (с)

Дальнейший рост  $\sigma$  с температурой может быть связан с увеличением  $n_e$  в результате начала разложения и спиноподального распада InGaN. Эти процессы не отслеживаются РД анализом до температур свыше  $500^\circ\text{C}$ , однако рост точечных дефектов, выступающих в качестве донорных центров, может приводить к увеличению  $n_e$ . Снижение  $\sigma$  при увеличении  $T_g$  свыше  $500^\circ\text{C}$ , может быть связано со снижением подвижности, в связи с деградацией кристаллического качества InGaN слоёв и развитием процессов спиноподального распада. Однако, анализ спектров ФЛ показывает, что интенсивность сигнала ФЛ растёт с  $T_g$  во всём исследуемом интер-

вале температур при сохранении таких своих характеристик как положение максимума (1000-1020 meV) и ширины линии (110-120 meV) (рис. 2). Постоянство ширины линии ФЛ говорит о неизменности  $n_e$  в излучающем слое InGaN. Общую картину может объяснить двухслойная модель InGaN, включающая в себя наличие дефектного, «интерфейсного» с GaN, слоя и «чистого» с более низкой концентрацией  $n_e$ , высоким кристаллическим качеством слоя, отвечающего, главным образом за ФЛ. Кристаллическое качество «чистого» слоя InGaN растёт с  $T_g$  (рис. 1б), что и приводит к росту интенсивности ФЛ. Удивительно, что к деградации ФЛ не приводят процессы спиноподального распада, которые явно проявляются на спектрах РД образца с InGaN слоем, выращенным при  $510^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2.** Зависимость интегральной интенсивности ФЛ и порога стимулированного излучения от  $T_g$ . Для образца С спектры излучения, соответствующие режимам спонтанной ФЛ и СИ, показаны на вставке (не в масштабе)

От всех выращенных InGaN слоев, кроме полученного при  $T_g = 510^\circ\text{C}$ , наблюдалось стимулированное излучение при низких температурах (рис. 2). Немонотонная зависимость порога СИ от  $T_g$  связывается с тем, улучшение кристаллического качества при  $T_g$  свыше  $480^\circ\text{C}$  начинает нивелироваться ростом оптических потерь в результате развития шероховатости поверхности.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Физика и технология микро- и наноструктур".

## Литература

1. D.N. Lobanov, *et al.* // Appl. Phys. Lett. 118, 151902 (2021)



# Сравнительный анализ свойств пленок наноструктурированных двумерных материалов, полученных различными методиками CVD синтеза

А.Б. Логинов<sup>1</sup>, С.Н. Бокова-Сирош<sup>2</sup>, Б.А. Логинов<sup>3</sup>, Р.Р. Исмагилов<sup>1</sup>, А.Н. Образцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы 1, г. Москва.

<sup>2</sup> ЗеленоградИнститут общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991, Москва, Россия

<sup>3</sup> МИЭТ, площадь Шокина 1, г. Зеленоград

\*loginov.ab15@physics.msu.ru

Была разработана установка для проведения CVD синтеза пленок, состоящих из наноструктурированных кристаллитов дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Разработанная установка CVD синтеза позволяет использовать различные методы подачи в газовую фазу прекурсоров, участвующих в дальнейшей реакции CVD синтеза. Были проведены серии экспериментов по осаждению пленок ДПМ, отличающихся друг от друга способом подачи прекурсоров, выбором материала подложки, температурой подложки и газовой фазы. Были получены пленки различных морфологий и представлена зависимость морфологии пленки от параметров роста. Исследования проводились в том числе с использованием встроенного в камеру синтеза атомно-силового микроскопа.

## Введение

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) представляют собой класс двумерных материалов, включающих в себя несколько десятков представителей, обладающих разными электронными свойствами. Особый интерес ДПМ материалы представляют в оптоэлектронике ввиду прямозонной структуры монослоев. Несмотря на многолетние исследования, масштабируемое производство ДПМ материалов для реального использования в электронной промышленности так и не было до сих пор налажено ввиду недостаточного качества получаемых пленок, неполного понимания процессов их формирования, и взаимосвязи параметров синтеза с морфологией и свойствами пленок. В данной работе представлен метод CVD синтеза пленок  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$  (являющихся наиболее заметными представителями ДПМ материалов), использующий различные способы подачи прекурсоров в реакционную камеру, обладающий возможностью независимо контролировать концентрации прекурсоров, и имеющий встроенное в камеру средство контроля морфологии пленок в виде модифицированного атомно-силового микроскопа.

## Экспериментальная часть

В качестве источника прекурсора халькогена (S) используется два источника: тигель с расплавленной серой, пары которой увлекаются газом-

носителем аргоном, и доставляются по кварцевой трубке к подложке; и газ сероводород, поток которого контролируется игольчатым клапаном. В качестве источника прекурсора халькогена используется: тигель с нагретым до температуры порядка  $700^\circ\text{C}$  порошкообразным  $\text{MoO}_3$  или  $\text{WO}_3$ ; нагреваемая проволока Mo, W; и распыляемые магнетроном Mo, W. В качестве подложек использовались пластинки Si(111) и  $\text{SiO}_2$  (300 nm) на поверхности Si(111), нагреваемые до температур порядка  $1000^\circ\text{C}$ . В ходе серий экспериментов с разными типами способами подачи прекурсоров и типами подложек, нагретых до различных температур были получены пленки, состоящие из треугольных кристаллитов  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  нанометровой толщины и микронных латеральных размеров, вертикально-ориентированных чешуек  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$ , и др.

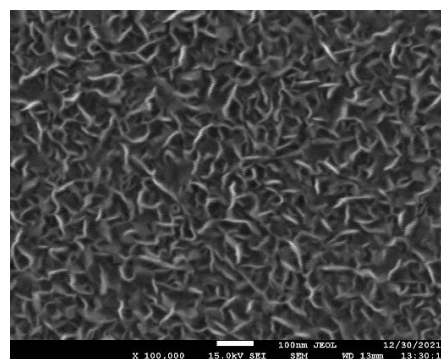


Рис. 1. Пленка вертикально ориентированных чешуек  $\text{MoS}_2$

## Литература

1. А.Б. Логинов, Р.Р. Исмагилов, С.Н. Бокова-Сирош, И.В. Божьев, Е.Д. Образцова, Б.А. Логинов, А.Н. Образцов. Формирование наноструктурированных пленок  $\text{mos}_2$ ,  $\text{ws}_2$ ,  $\text{moo}_2$  и гетероструктур на их основе. *Журнал технической физики*, 91(10):1509–1516, 2021.

# Динамика сверхструктурных переходов при низкотемпературном росте наноструктур по Странскому-Крастанову

К.А. Лозовой\*, В.В. Дирко, А.П. Коханенко, О.И. Куkenов, В.П. Винарский

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

\*lka@sibmail.com

В данной работе проводится анализ сверхструктурных переходов при эпитаксиальном росте двумерных слоев и формировании квантовых точек по механизму Странского – Крастанова в упруго-напряженных системах методом дифракции быстрых электронов.

Настоящая работа посвящена исследованию процессов, протекающих при эпитаксиальном выращивании двумерных материалов и квантовых точек в упруго-напряженных системах, рассогласованных по параметру решетки. В таких системах наблюдается так называемый рост по механизму Странского – Крастанова, в результате которого можно получить как напряженные двумерные слои, так и частично релаксированные трехмерные островки, которые могут служить основой для создания различного типа приборов.

Наноструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками уже около десятка лет активно используются при создании фотодетекторов, солнечных элементов и светоизлучающих устройств для таких быстро развивающихся областей как нанозлектроника и нанопотоника. Кроме того, в последнее время осознается перспективность использования подобных структур для создания приборов совершенно нового уровня, например, топологических транзисторов, твердотельных спиновых кубитов, высокочувствительных сенсоров. Помимо этого, сложный характер поведения величины и распределения упругих напряжений в системе квантовые точки/двумерный слой, делает возможным их направленную модификацию с целью создания структур для современной стрейнтроники.

В настоящей работе эпитаксиальное осаждение германия на поверхность кремния проводилось в сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии, оснащенной двумя электронно-лучевыми испарителями для кремния и германия. Аналитическая часть камеры состоит из масс-спектрометра, кварцевого измерителя толщины, инфракрасного пирометра и дифрактометра быст-

рых электронов с энергией 28 кэВ. Для обработки изображений и анализа картин дифракции быстрых электронов разработана программа с использованием собственных алгоритмов. Благодаря высокому разрешению дифрактометра удалось более точно проследить за зависимостью положения дифракционных пиков от толщины и температуры. Скорость осаждения германия составляла 0,3 МС/мин (1 МС = 0,145 нм). Относительно низкая скорость осаждения также была выбрана с целью детально проследить за изменением состояния поверхности и положением дифракционных рефлексов в зависимости от эффективной толщины осажденного материала. Диапазон температур роста, измеряемых на поверхности подложки, составлял от 200 до 600 °С.

В результате получены детальные зависимости параметра периодичности  $N$  реконструкции типа  $2 \times N$  от эффективной толщины осажденного материала в широком интервале ростовых температур при эпитаксии германия на поверхность кремния с кристаллографической ориентацией (001). Впервые исследованы сверхструктурные переходы и смена величины параметра  $N$  при низких температурах эпитаксии в этой системе. Показано, что длина димерных рядов в такой реконструкции при росте чистого германия на кремнии может достигать величины не менее  $N = 11$ . Найдена связь между величиной параметра  $N$ , определяемого упругими напряжениями в системе, и величиной критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту.

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

# 2D-3D переход, стимулированный изменением элементного состава на поверхности слоя GaN

Я.Е. Майдэбура<sup>1\*</sup>, В.Г. Мансуров<sup>1</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, К.С. Журавлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, пк. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*hnxyr5@gmail.ru

Методом дифракции быстрых электронов на отражение исследовано превращение двумерного упруго напряженного слоя GaN на поверхности AlN в квантовые точки GaN (прямой 2D-3D переход) после выключения потока аммиака при различных температурах. Было обнаружено, что после прямого 2D-3D перехода происходит обратный 3D-2D переход, квантовые точки превращаются в упруго напряженный двумерный слой. Рассчитано изменение элементного состава и поверхностной энергии GaN после выключения аммиака. Показано, что прямой и обратный 2D ↔ 3D переходы объясняются немонотонным поведением поверхностной энергии из-за конкуренции двух процессов: десорбции частиц NH<sub>2</sub> и H и перемещения, и закрепления частиц NH<sub>2</sub>, NH и N в энергетически более выгодных положения на поверхности GaN.

## Введение

Электронные и оптические свойства полупроводниковых квантовых точек (КТ) вызывают большой интерес исследователей за счет яркого проявления квантово-размерных эффектов, что важно при создании одноэлектронных транзисторов, однофотонных излучателей и светоизлучающих диодов. Типичным способом формирования КТ при росте в молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является рост по механизму Странского-Крастанова (С-К), который заключается в преобразовании двумерного (2D) слоя в трехмерные (3D) островки (2D-3D переход) во время роста при достижении критической толщины слоя (например, в системах InAs/GaAs и Ge/Si).

В системе GaN/AlN помимо традиционного механизма С-К, наблюдается так называемый модифицированный механизм С-К, в котором для 2D-3D перехода необходимым условием является остановка роста и модификация поверхности слоя GaN, и в случае МЛЭ с аммиаком в качестве источника азота модификация заключается в отключении потока аммиака.

Для описания модифицированного и традиционного механизма С-К используется модель равновесия Mariette [1], согласно которой 2D-3D переход становится энергетически выгоден, когда выигрыш при релаксации упругой энергии, запасенной в 2D слое, превышает затраты на создание новых поверхностей КТ. Затраты поверхностной энергии на создание граней КТ, согласно [1,2], с увеличением поверхностной энергии слоя GaN снижаются, что в итоге

может являться причиной 2D-3D перехода. Однако на данный момент механизмы, приводящие к увеличению поверхностной энергии и 2D-3D переходу, остаются не ясными.

## Методика эксперимента

2D-3D переход был исследован с помощью установки аммиачной МЛЭ СВЕ-32 Riber. Буферный слой AlN толщиной около 360 нм и слой GaN толщиной ≈ 2 нм были выращены на сапфировых подложках с ориентацией (0001). Слой AlN выращивался при температуре 990 °С и потоке аммиака 75 sccm; слой GaN выращивался при температуре 790 °С и потоке аммиака 275 sccm. Морфологические 2D-3D переходы изучались *in situ* с помощью дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Регистрация эволюции дифракционной картины и последующий анализ поведения рефлексов проводились с помощью системы kSA 400. При изучении кинетики перехода 2D-3D температура подложки изменялась в диапазоне 690-915 °С.

## Результаты и обсуждение

В результате были получены кинетики интенсивности 3D рефлекса при отключении аммиака для различных температур, а также кинетика 3D рефлекса при последовательном изменении температуры подложки в низком потоке аммиака. На основе полученных кинетических кривых были исследованы особенности 2D-3D перехода, такие как немонотонное поведение интенсивности 3D рефлекса GaN, когда первоначальное увеличение сменяется уменьше-

нием; уменьшение максимального значения интенсивности 3D GaN рефлекса при выключении потока аммиака с ростом температуры; уменьшение времени задержки 2D-3D перехода с ростом температуры.

Особенности 2D-3D перехода выходят за рамки существующей теории развитой в работе Mariette. Для объяснения механизмов, которые приводят к 2D-3D переходу, а также особенностей 2D-3D перехода, мы разработали кинетическую модель в форме системы дифференциальных уравнений. В кинетической модели записываются изменения концентрации фрагментов аммиака через соответствующие константы реакцией с помощью уравнения Аррениуса  $k=k_0\exp(-E_a/k_B T)$ , которое включает предэкспоненциальный множитель  $k_0$  и энергию активации  $E_a$ . Помимо концентрации частиц, учитывается их положение на поверхности слоя GaN. Например, частица NH может находиться в различных энергетических положениях, таких как T1 (непосредственно над поверхностным атомом Ga), Bridge (соединяет два поверхностных атома Ga), а также в положении H3, соединяющем три поверхностных атома Ga над пустым пространством первого подслоя.

Модель решается численно в MATLAB методом конечных разностей. Рассчитанное с помощью модели изменение элементного состава на поверхности GaN с учетом положения адсорбированных частиц мы связали с изменением поверхностной энергии слоя GaN после отключения аммиака с помощью формулы  $\gamma=E_b N_{\text{sites}}/2$ , где  $E_b$  - энергия связи, а  $N_{\text{sites}}$  - плотность адсорбционных мест на поверхности GaN.

В результате сравнения экспериментальных кривых интенсивности 3D рефлекса и рассчитанных кривых поверхностной энергии 2D слоя удалось объяснить механизмы 2D-3D перехода и его особенности. Так,

немонотонное поведение интенсивности 3D рефлекса GaN связано с немонотонным поведением поверхностной энергии из-за конкуренции между процессами десорбции и перемещения частиц в энергетически более выгодные позиции; уменьшение максимального значения интенсивности 3D GaN рефлекса при выключении потока аммиака с ростом температуры связано с уменьшением максимального значения поверхностной энергии вследствие одновременного уменьшения поверхностной энергии граней КТ и значения  $\gamma_{\text{crit}}$  с ростом температуры, а также ускорения процесса перемещения частиц в энергетически более выгодные позиции; уменьшение времени задержки 2D-3D перехода с ростом температуры связано с ускорением процессов десорбции частиц с поверхности GaN и процессов перемещения частиц на более энергетически выгодные участки, а также за счет уменьшения поверхностной энергии граней КТ.

## Заключение

Таким образом, для выяснения механизмов, которые приводят к преобразованию 2D слоя GaN в 3D островки при отключении аммиака, и особенностей 2D-3D перехода, мы экспериментально исследовали кинетику интенсивности 3D рефлекса методом ДБЭО, а также разработали модель, с помощью которой было рассчитано изменение элементного состава на поверхности GaN, и связанное с этим изменение поверхностной энергии слоя GaN при отключении потока аммиака для различных температур.

## Литература

1. Mariette. // Comptes Rendus Phys. 6. 23-32 (2005).
2. Damilano, J. Brault, J. Massies. // J. Appl. Phys. 118 (2015).

# Кинетика генерации циркулярно-поляризованного света полупроводниковым инжекционным лазером при возбуждении прямоугольными электрическими импульсами

А.А. Максимов\*, Е.В. Филатов, И.И. Тартаковский

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2.

\*maksimov@issp.ac.ru

Выполнены подробные экспериментальные исследования стимулированного лазерного излучения с высокой степенью циркулярной поляризации в хиральных инжекционных полупроводниковых лазерных наноструктурах, возбуждаемых длинными прямоугольными электрическими импульсами, с временным разрешением и при различных температурах.

## Введение

Создание компактных устройств, с помощью которых можно управлять состоянием поляризации излучаемого света, является одной из центральных задач нанofотоники. По аналогии со спин-поляризованными инжекторами тока в спинтронике компактные источники циркулярно-поляризованного излучения открывают возможность их дальнейшего практического применения в таких интенсивно развивающихся областях, как квантовые технологии оптического управления информацией и оптоэлектроника.

Обычные способы получения циркулярно-поляризованного излучения заключается в использовании четвертьволновых пластин, которые далеки от компактности. Другой подход к реализации компактных лазеров, которые могут излучать циркулярно-поляризованный свет, предполагает использование оптической либо электрической спиновой накачки (так называемые спин-лазеры), или оптических хиральных сред в активной области таких лазеров. В последнее время в целом ряде работ [1-5] было продемонстрировано, что создание компактных устройств циркулярно-поляризованного излучения может быть осуществлено при использовании наноструктур на основе обычных ахиральных  $A^{III}B^V$  полупроводников. Отличительной особенностью данных наноструктур является наличие в их верхнем слое сформированного с помощью современных полупроводниковых технологий фотонного кристалла с квадратной решеткой, обладающей хиральной сим-

метрией. Благодаря общей хиральной симметрии такой системы возникает неэквивалентность право- и лево-поляризованных электромагнитных мод, что, тем самым, открывает возможности для создания компактных источников циркулярно-поляризованного излучения без приложения внешнего магнитного поля. Важным шагом в этом направлении, имеющим также прикладное значение, была реализация инжекционных полупроводниковых лазеров с высокой степенью поляризации циркулярно-поляризованного излучения [3,4], работающих вплоть до температур  $\sim 100$  К [5].

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям кинетики стимулированного излучения инжекционных хиральных полупроводниковых лазерных структур при их возбуждении электрическими импульсами различной длительности.

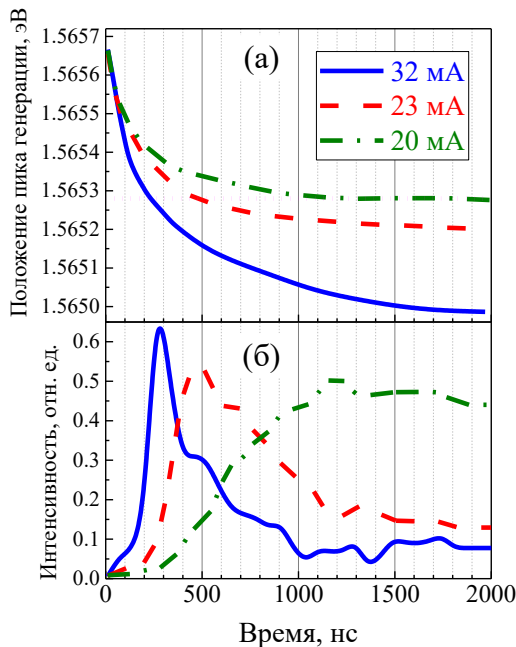
## Методика и результаты эксперимента

Изучались полупроводниковые инжекционные лазеры с электрической накачкой на основе  $\lambda$ -микрорезонатора  $Al_{0.40}Ga_{0.60}As$  с GaAs квантовыми ямами в активной области. Верхний слой лазеров представлял собой квадратную решетку из хиральных структур, изготовленных травлением [3,4], что позволяло получать высокую степень циркулярной поляризации излучения ( $\rho_c > 0.7$ ) в отсутствие магнитного поля вплоть до температур  $\sim 100$  К [5]. Было установлено, что повышение температуры образца приводит к сдвигу полос излучения лазеров в красную



область в соответствии с изменением показателя преломления материала микрорезонатора.

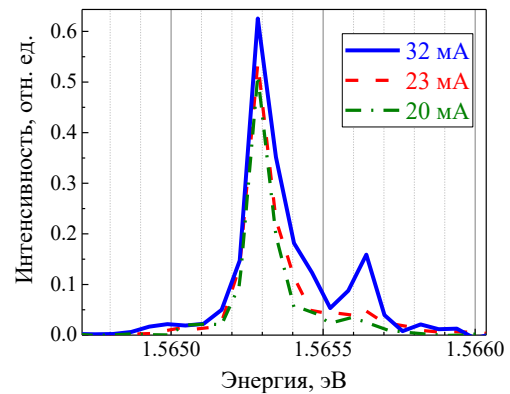
В настоящей работе исследовались изменения спектров излучения лазеров в зависимости от времени после начала возбуждающего импульса в условиях развитой многомодовой генерации. Образец с лазерами помещался в гелиевый криостат при температуре  $\sim 2$  К. Для возбуждения люминесценции использовался автоматизированный генератор с длительностью прямоугольных импульсов от 10 нс. На выходе генератора стоял аттенуатор 10 dB, согласованный с нагрузкой 50 Ом, для подавления отражения от образца. Спектры люминесценции, измеренные при различных длительностях импульса, вычитались друг из друга, что эквивалентно измерениям с временным разрешением при возбуждении длинным импульсом.



**Рис. 1.** Спектральное положение линии генерации хиральной полупроводниковой лазерной структуры в  $\sigma^+$  циркулярной поляризации (а) и ее интенсивности (б) в различные моменты времени после начала возбуждения длинным прямоугольным электрическим импульсом при различных значениях импульсного тока. Температура  $T = 2$  К

На рис. 1 показана позиция и амплитуда полосы излучения одной из лазерных мод в зависимости от времени после начала возбуждающего импульса при различных напряжениях импульса на выходе генератора. Наблюдается сдвиг полосы излучения в красную область, связанный с неравновесными процессами в электронной и фононной подсистемах в

активной области лазерной структуры. Значение сдвига полосы увеличивается с ростом прикладываемого напряжения и достигает  $\sim 0.6$  мэВ к  $\sim 1$  мкс после начала импульса при максимальном импульсном токе. Максимум интенсивности лазерной генерации (рис. 1б) наблюдается в момент времени, когда ее спектральное положение совпадает с оптимальной для данного микрорезонатора модой излучения, позиция которой отмечена на рис. 1а точечной линией. Как показано на рис. 2, спектры основной моды лазерной генерации в эти моменты действительно совпадают.



**Рис. 2.** Спектры излучения лазера при различных значениях импульсного тока в моменты времени: 280, 460 и 1200 нс, соответственно, отвечающие максимальной интенсивности основной моды генерации (см. рис. 1б)

Данная работа частично поддержана проектом РФФИ № 20-02-00534.

## Литература

1. A. A. Maksimov, I. I. Tartakovskii, E. V. Filatov *et al.* // *Physical Review B* **89**, 045316 (2014).
2. S. V. Lobanov, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius, A. A. Maksimov *et al.* // *Physical Review B*, **92**, 205309 (2015).
3. А. А. Максимов, Е. В. Филатов, И. И. Тартаковский // *Известия РАН. Серия физическая*, т. 85, № 2, 241–244 (2021).
4. A. A. Maksimov, E. V. Filatov, I. I. Tartakovskii *et al.* // *Letter to Physical Review Applied*, *in print* (2022).
5. А. А. Максимов, Е. В. Филатов, И. И. Тартаковский // *Известия РАН. Серия физическая*, т. 86, № 4, 497–500 (2022).

# Полупроводниковые гетероструктуры для мощных лазерных диодов повышенной эффективности

А.А. Мармалюк<sup>1,\*</sup>, Н.А. Волков<sup>1</sup>, Н.В. Гультиков<sup>1</sup>, Ю.Л. Рябоштан<sup>1</sup>, М.А. Ладугин<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>2</sup>, А.В. Лютецкий<sup>2</sup>, Д.А. Веселов<sup>2</sup>, Н.А. Пихтин<sup>2</sup>, Л.И. Шестаков<sup>3</sup>, А.А. Козырев<sup>3</sup>, В.А. Панарин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», ул. Введенского, 3, Москва, 117342.

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>3</sup> ООО «НПП «Инжект», ул. Элмашевская, 3а, Саратов, 410033.

\*almarm@mail.ru

В данной работе рассмотрено влияние параметров полупроводниковых гетероструктур на саморазогрев лазеров и насыщение их выходной мощности. Показано, что снижение последовательного сопротивления и напряжения отсечки позволяет снизить температуру активной области в рабочей точке, отодвинуть момент начала насыщения выходной оптической мощности и увеличить КПД.

## Введение

Лазерные диоды с повышенной выходной мощностью востребованы для многих практических применений. Традиционно, такие приборы базируются на двойных гетероструктурах с отдельным ограничением (РО-ДГС) с одной или несколькими квантовыми ямами в активной области. Для достижения повышенной выходной мощности хорошо зарекомендовали себя конструкции лазерных диодов с расширенным волноводом, позволяющим снизить уровень внутренних оптических потерь, что позволяет повысить дифференциальную квантовую эффективность и использовать лазеры с увеличенной длиной резонатора. Дополнительным преимуществом такой конструкции является снижение плотности лазерного излучения на гранях резонатора, что отодвигает предел достижения катастрофической оптической деградации зеркал.

Известно, что одной из важных причин насыщения выходной оптической мощности лазерных диодов с ростом тока накачки в непрерывном режиме генерации выступает делокализация носителей заряда из активной области в волноводные слои. При этом, особую роль играет выброс и накопление электронов в р-части волновода. В связи с чем, перспективными выглядят подходы по выбору конструкций гетероструктур, в которых квантовые ямы активной области максимально приближены к р-эмиттеру. Такое решение позволит улучшить теплоотвод от активной области, что будет способствовать сохранению наклона ватт-амперной ха-

рактеристики при увеличении тока накачки. Вместе с тем, сокращение ширины волноводных слоев приведет к повышению внутренних оптических потерь, из-за увеличения проникновения оптической моды в легированные эмиттерные слои.

Другим направлением повышения эффективности лазерных диодов могут служить меры, нацеленные на улучшение их вольт-амперной характеристики. Это возможно, например, переходя к более узкозонным легированным волноводным слоям. Однако, уменьшение ширины запрещенной зоны таких слоев будет приводить к одновременному уменьшению энергетической глубины квантовых ям, что будет усиливать процессы делокализации носителей в волновод.

Следовательно, для использования представленных подходов на практике необходимо изучить влияние указанных факторов на выходные характеристики лазерных диодов, чему и посвящена данная работа

## Эксперимент

Лазерные квантоворазмерные гетероструктуры AlGaInAs/InP и InGaAs/AlGaAs/GaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии.

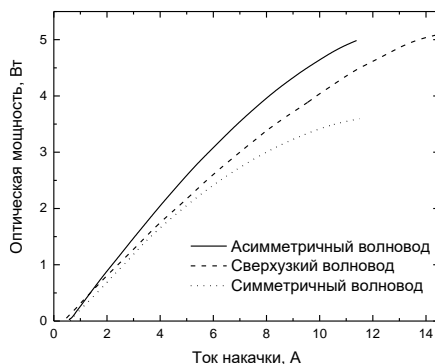
Исследовались три конфигурации гетероструктур AlGaInAs/InP: с расширенным симметричным волноводом, сверхузким волноводом и сильно асимметричным волноводом, где квантовые ямы максимально приближены к р-эмиттеру.

В системе материалов InGaAs/AlGaAs/GaAs также исследовались три конфигурации гетероструктур с широким волноводом, отличающиеся составом волноводных слоев. Изучались образцы с базовым составом  $x_w=0.3$  волноводных слоев  $Al_xGa_{1-x}As$ , а также с составами, со сниженным содержанием Al в два и три раза:  $x_w=0.15$  и  $x_w=0.1$ .

Из полученных гетероструктур изготовлены лазерные диоды с шириной полоскового контакта 100 мкм и изучены их выходные характеристики.

## Результаты

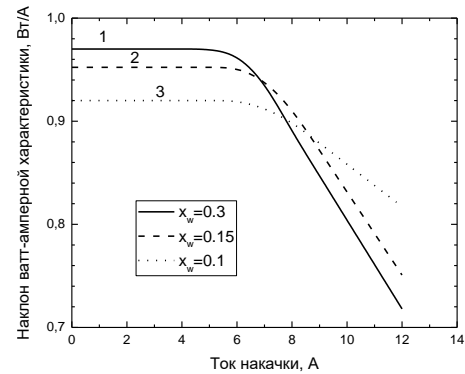
Переход от расширенного симметричного волновода к сверхузкому в лазерных диодах на основе AlGaInAs/InP позволил снизить последовательное электрическое и тепловое сопротивление приборов и добиться более высокой выходной мощности [1]. Использование сильно асимметричного волновода, благодаря снижению внутренних оптических потерь по сравнению с лазерами на основе сверхузкого волновода, дало возможность увеличить дифференциальную эффективность на начальном участке [2]. Однако, лучшие условия отвода тепла от активной области в лазерах со сверхузким волноводом обеспечили таким приборам сохранение наклона ватт-амперной характеристики с ростом тока накачки [3]. Это позволило достигнуть тех же значений выходной мощности, что и у лазеров на основе асимметричного волновода (рис. 1).



**Рис. 1.** Ватт-амперные характеристики лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с различными типами волноводов

Снижение содержания Al в волноводных слоях AlGaAs лазерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs

позволило улучшить их вольт-амперную характеристику и благодаря этому уменьшить саморазогрев приборов при увеличении тока накачки. Такой подход позволил лазерным диодам с узкозонными волноводами дольше сохранять наклон ватт-амперной характеристики (рис. 2). В итоге, указанные приборы имели КПД на 15-20% выше по сравнению с базовым вариантом.



**Рис. 2.** Зависимость наклона ватт-амперной характеристики лазерных диодов на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с вариацией состава волноводных слоев: 1 –  $x_w=0.3$ ; 2 –  $x_w=0.15$ ; 3 –  $x_w=0.1$

Положительный эффект от улучшения вольт-амперной характеристики при использовании узкозонных волноводов перекрывает негативное влияние уменьшения энергетической глубины квантовых ям.

## Выводы

Подходы по улучшению вольт-амперной характеристики лазерных диодов благоприятно сказываются на повышении их эффективности и КПД.

## Литература

1. А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, П.В. Горлачук и др. // Квантовая электроника, Т. 47, 272 (2017).
2. Н.А. Волков, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая и др. // Квантовая электроника, Т. 51, 133 (2021).
3. Н.А. Волков, В.Н. Светогоров, Ю.Л. Рябоштан и др. // Квантовая электроника, Т. 51, 283 (2021).

# Характеризация тонких пленок AlN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира

Д.С. Милахин<sup>1,\*</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, В.Г. Мансуров<sup>1</sup>, Ю.Г. Галицын<sup>1</sup>, А.С. Кожухов<sup>1</sup>, Н.Н. Новикова<sup>2</sup>, В.А. Яковлев<sup>2</sup>, К.С. Журавлёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова (ИФП) СО РАН, пр. академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Институт спектроскопии РАН (ИСАН), ул. Физическая, 5, Москва, Троицк, 108840.

\*dmlakhin@isp.nsc.ru

Методом ДБЭО исследована степень завершенности процесса нитридации сапфира и ее влияние на рост последующего буферного слоя AlN. Было обнаружено, что ~ 85 % завершенность образования кристаллической фазы AlN на поверхности сапфира способствует росту двумерного буферного слоя AlN с гладкой морфологией поверхности и металлической полярностью, в отличие от роста AlN со слабой или избыточной нитридацией сапфира, в результате которого образуется поликристаллическая, либо трехмерная структура AlN с высокой плотностью инверсионных доменов, соответственно. Независимыми методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и ИК-спектроскопии поверхностных поляритонов была определена толщина зародышевого слоя AlN при ~ 85 % степени завершенности процесса нитридации, которая составила ~ 1 монослой.

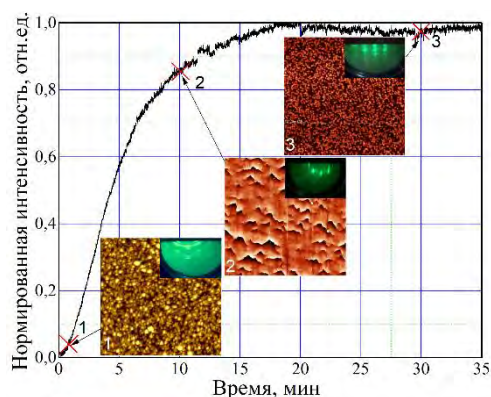
## Введение

Сапфир ( $Al_2O_3$ ) является наиболее распространенным подложечным материалом ввиду оптической прозрачности, высокого кристаллического совершенства и низкой стоимости для эпитаксиального роста  $A_3$ -нитридных гетероструктур, широко востребованных в опто- и нанoeлектронных приложениях. При росте большинства  $A_3$ -нитридных гетероструктур на  $Al_2O_3$  в качестве буферного слоя используется AlN. С целью согласования буферного слоя AlN с инородной подложкой сапфира осуществляется процесс нитридации. В результате данного процесса на поверхности подложки формируется кристаллический зародышевый слой AlN, согласующийся с буферным слоем AlN по параметру решетки.

Регистрация процесса нитридации в МЛЭ осуществляется *in situ* методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) по изменению интенсивности дифракционного рефлекса, связанного с кристаллической фазой AlN, от времени и отображается в виде кинетических кривых [1]. Несмотря на то, что условия нитридации (температура подложки, поток аммиака) влияют на скорость образования кристаллической фазы AlN, форма кинетической кривой при этом остается неизменной [1], поэтому важно определить, на каком участке кинетической кривой нитридации следует начинать рост буферного слоя AlN.

## Результаты и обсуждение

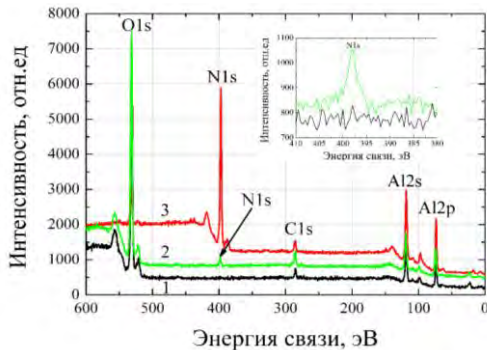
На экспериментальной кинетической кривой процесса нитридации сапфира было выбрано несколько точек (рисунок 1), с которых начиналось зарождение буферного слоя AlN. Показано, что, если рост AlN начинать на нитридованной поверхности сапфира, соответствующей точке 3 на кинетической кривой, образуется 3D AlN с высокой плотностью



**Рис. 1.** Кинетическая кривая процесса нитридации со вставками АСМ изображений  $15 \times 15 \text{ мкм}^2$  и дифракционных картин (ДК) выращенных буферных слоев AlN (1 мкм) при разной степени завершенности нитридации. Высота по шкале Z составила 110 нм для АСМ изображения (3), 10 нм для (2), 65 нм для (1). Высота инверсионных доменов на поверхности пленки (3) составила ~ 40 нм, на АСМ изображении поверхности (2) инверсионные домены отсутствуют, шероховатость поверхности составила ~ 0,5 нм

инверсионных доменов (рисунок 1(3)). В случае выбора начальной точки 2, соответствующей ~ 85 % завершенности нитридации, при росте буферного слоя AlN формируется двумерная пленка с гладкой морфологией поверхности (рисунок 1(2)) и металлической полярностью, о чем свидетельствует отражательная ДК и реконструкция (2x2). Эпитаксиальный рост AlN в точке 1, соответствующей слабо нитризованной поверхности сапфира, характеризуется огрублением поверхности, что в последствии приводит к росту поликристалла (рисунок 1(1)).

Для получения информации о толщине нитризованного слоя для случая с ~85% завершенностью процесса нитридации, образец исследовался двумя независимыми методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и ИК-спектроскопии поверхностных поляритонов. Методом РФЭС регистрировалось изменение химического состава поверхности Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и спустя 10 мин после нитридации при 840 °С в аммиаке 25 норм. мл/мин. На рисунке 2 показаны спектры исходной и нитризованной поверхностей (0001) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



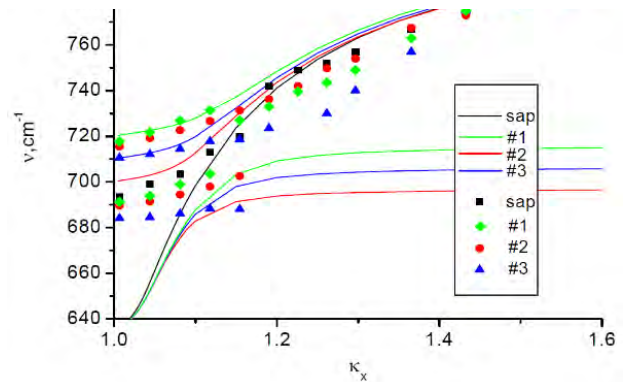
**Рис. 2.** РФЭС-спектры образцов: 1 – исходная поверхность (0001) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 – нитризованная поверхность (0001) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 – поверхность буферного слоя (0001) AlN. На вставке изображены спектры исходной (1) и нитризованной (2) поверхностей Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в области пика N1s

На вставке к рисунку 2 отчетливо видно появление пика атома азота N1s. Толщина зародышевого слоя AlN, синтезированного в результате нитридации, рассчитывалась по формуле 1 и составила ~2 Å или ~1 монослой (МС).

$$I = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{d}{\lambda}} \right), \quad (ф1)$$

где  $I_0$  – калибровочная интенсивность N1s пика атома азота в буферном слое AlN,  $I$  – интенсивность N1s пика атома азота в нитризованном Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $d$  – толщина сформированного на поверхности сапфира слоя AlN,  $\lambda$  – характерная глубина выхода электронов.

Поверхностные поляритоны (ПП) представляют собой вид безызлучательных электромагнитных колебаний, возникающих в результате сильного взаимодействия электромагнитных волн (ИК фотонов) с оптическими фононами и распространяющихся вдоль границы раздела двух сред, если одна из них является поглощающей. Совпадение поперечной оптической (ТО) частоты AlN с частотой ПП приводит к появлению щели в кривой дисперсии ПП (рисунок 3).



**Рис. 3.** Кривые дисперсии для исходного (квадраты) и трех нитризованных в разной степени образцов сапфира: #1 – ромбы, #2 – кружки, #3 – треугольники

Положение щели определяется частотой ТО-фонона, которая зависит от кристаллической структуры, атомного состава и деформации пленки AlN и т. д. Толщина пленки AlN пропорциональна квадрату величины щели энергетического спектра согласно формуле  $d = 2\Delta^2 \lambda^3$ , где  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения (~ 1 мкм). Толщина зародышевого слоя AlN согласно данной формуле, составила ~ 0,25 нм или ~ 1 монослой (МС).

Таким образом в данной работе установлено, что при ~85% завершенности процесса нитридации сапфира с формированием на его поверхности зародышевого слоя AlN толщиной ~ 1 МС, последующий рост буферного слоя AlN будет осуществляться без инверсионных доменов.

Предполагается, что увеличение толщины нитризованного слоя приводит к формированию большего числа отклоненных зародышей AlN и увеличению количества инверсионных доменов.

### Литература

1. D.S. Milakhin, T.V. Malin *et al.* // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, V. 133, 1099 (2018).

# Энергетический спектр и магнитотранспорт квантовых ям HgTe при переходе от состояния 2D к состоянию 3D топологического изолятора

Г.М. Миньков<sup>1,\*</sup>, А.А. Шерстобитов<sup>1</sup>, В.Я. Алёшкин<sup>3</sup>, О.Э. Рут<sup>2</sup>, А.В. Германенко<sup>2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской 18, Екатеринбург, 620099.

<sup>2</sup> Уральский Федеральный Университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620083.

<sup>3</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>4</sup> Институт физики полупроводников им. Ф.В.Ржанова Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия.

\*Grigori.Minkov@urfu.ru

Экспериментально исследованы гальваномагнитные и магнито-емкостные явления в квантовых ямах (КЯ) HgTe шириной от 20 до 50 нм, соответствующих переходу от спектра двумерного топологического изолятора к спектру трехмерного топологического изолятора.

Энергетический спектр и транспортные явления квантовых ям (КЯ) HgTe с толщиной ямы 4-20 нм достаточно подробно исследовались, различными методами. Оптическими (магнитооптическими) методами, фотопроводимостью в широком диапазоне энергий кванта (начиная с ТГц); магнитотранспортными. Было показано, что в целом (в основном) энергетический спектр разумно описывается в рамках (3-4)-зонной kP модели, в которой следует учитывать СО взаимодействие. В валентной зоне основной вклад в СО взаимодействие дает асимметрия интерфейсов, а в зоне проводимости – эффект Бычкова-Рашбы.

Много работ было посвящено изучению проводимости по краевым состояниям (edge states), которые, согласно теоретическим предсказаниям должны быть топологически защищены от рассеяния. Однако в большинстве экспериментов длина свободного пробега по таким состояниям не превышала 1-3 мкм. Другое предсказание теории касается особенностей спектра и волновых функции в широких квантовых ямах HgTe. Было предсказано, что в достаточно широких квантовых ямах должны существовать «односпиновые» поверхностные состояния, локализованные у границ квантовой ямы. Исследования таких структур привлекло большое внимание экспериментаторов. В основном исследовались структуры с шириной ямы 60-90 нм. В настоящей работе исследованы КЯ HgTe шириной от 20 нм

до 50 нм, соответствующей переходу от спектра двумерного топологического изолятора к спектру трехмерного топологического изолятора.

Совместный анализ результатов гальваномагнитных и магнито-емкостные явления показывают:

1. При увеличении концентрации электронов за счет напряжения затвора спектр зоны проводимости расщепляется. Основной вклад в это расщепление дает электрическое поле в квантовой яме (механизм Бычкова-Рашбы). С ростом ширины КЯ величина расщепления увеличивается так что в КЯ 46 нм при полной концентрации  $3.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  отношение концентраций в ветвях приближается к 2 (на самом деле 1.8).

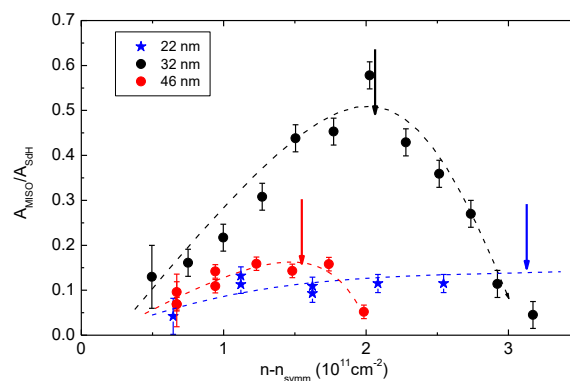


Рис. 1. Зависимости относительной амплитуды MISO от концентрации электронов в исследованных структурах.  $T = 4 \text{ K}$ . Стрелки показывают концентрацию электронов, при которой начинается заполнение 2-й подзоны размерного квантования



2. Во всех структурах изучены магнито-межподзонные осцилляции (MISO). Показано, что зависимость амплитуды MISO ( $A_{MISO}$ ) от концентрации электронов немонотонна. Она возрастает до начала заполнения второй подзоны размерного квантования, а затем резко падет (Рис. 1). Рост амплитуды MISO противоречит простым расчетам спектра и волновых функций Рис. 2а), которые предсказывают увеличение локализации волновых функций спин-орбитально расщепленных ветвей спектра у противоположных стенок КЯ, а значит к уменьшению их (волновых функций) перекрытия, уменьшению вероятности переходов между ветвями спектра, а значит и к уменьшению  $A_{MISO}$ ;

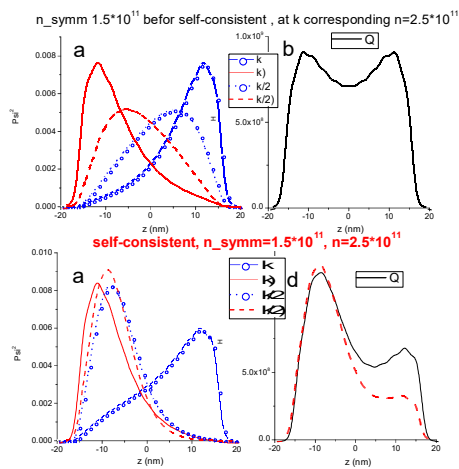


Рис. 2. Распределение волновых функций и заряда до самосогласования (а,б) и после (с,д) в КЯ 32 нм

3. Проведены самосогласованные расчеты спектра и волновых функций. Они предсказывают значительное смещение заряда спин-орбитально расщепленных ветвей спектра в направлении, перпендикулярном плоскости КЯ (Рис. 2в). При этом состояния, локализованные у ближней к полемому электроду гетерограницы отталкиваются от положительно заряженного полевого электрода. Это соответствует отрицательному знаку поляризуемости;

4. Для экспериментальной проверки столь необычного поведения были измерены зависимости емкости КЯ-полевой электрод от напряжения затвора (Рис. 3). Анализ квантовой емкости, найденной из этих измерений, при использовании эффективных масс электронов и дырок, измеренных на тех же структурах, показывает, что электроны, локализованные у ближней к полемому электроду гетерограницы действительно отталкиваются от положительно заряженного полевого электрода;

5. Показано, что самосогласованные расчеты спектра и волновых функций для d КЯ >20-25 нм при использовании общепринятых объемных параметров HgTe и HgCdTe дают лишь качественное согласие с экспериментом.

Возможной причиной такого расхождения может быть существенное отличие диэлектрическая проницаемость КЯ HgTe от проницаемости объемного HgTe.

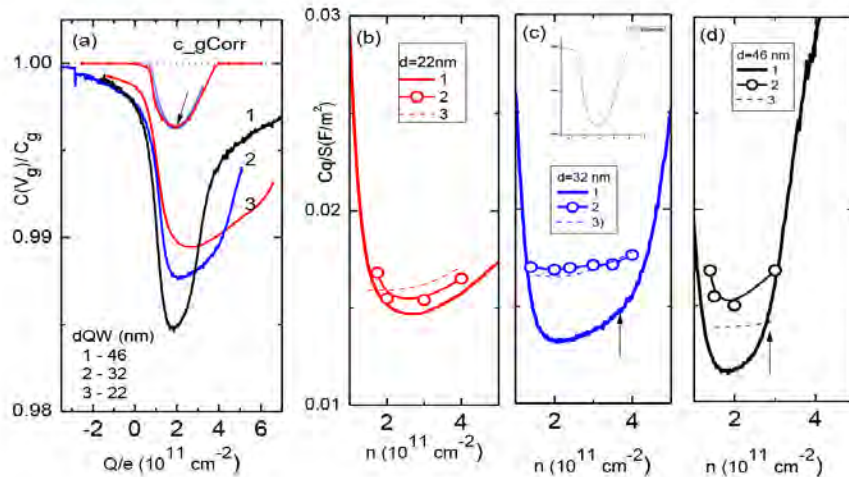


Рис. 3. (а) Зависимости относительной емкости  $C(V_g)/C_g$  ( $C_g$  геометрическая емкость) от заряда КЯ. (b, c, d) Зависимости квантовой емкости ( $C_q/S$ ) от концентрации электронов в яме (сплошные кривые); вставка на Рис. 3с – коррекция  $C_g$ , необходимая для согласования  $C_q/S$  с эффективными массами электронов и дырок, измеренным на тех же образцах

# Квантовые биения экситонов с легкими и тяжелыми дырками в спектрах отражения в квантовой яме GaAs/AlGaAs

А.В. Михайлов<sup>1,\*</sup>, А.В. Трифонов<sup>1,2</sup>, О.С. Султанов<sup>1</sup>, И.Ю. Югова<sup>1</sup>, И.В. Игнатъев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория Оптики спина Санкт-Петербургского государственного университета, Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034.

<sup>2</sup> Experimentelle Physik 2, Technische Universität Dortmund, Dortmund, D-44221, Germany.

\*mikhailovav@yandex.ru

В работе экспериментально исследована динамика состояний легких и тяжелых экситонов в квантовой яме при когерентном возбуждении обоих экситонных резонансов в ко- и кросс-линейных и циркулярных поляризациях накачки и зондирования. В характеристиках экситонных резонансов наблюдались квантовые биения, по которым определена структура уровней системы легкого и тяжелого экситонов с помощью теоретического моделирования экспериментальных данных.

При возбуждении многоуровневой квантовой системы в суперпозиционное состояние возможно наблюдение квантовых биений. Для этого необходимо существование общего основного состояния. Если тяжелые и легкие экситоны в квантовой яме образуют систему с общим состоянием, их квантовые биения можно наблюдать в осцилляциях дипольного момента оптических переходов. Такие осцилляции были обнаружены экспериментально, например, в сигналах четырех-волнового смешения [1,2] и дифференциального пропускания [3,4]. Однако точная структура состояний системы, состоящей из тяжелого и легкого экситонов с разными спинами, не выяснена. Это оставляет возможность альтернативного объяснения осцилляций интерференцией поляризаций, которая наблюдается во вторичном излучении двух независимых двухуровневых систем при их когерентном возбуждении. Поэтому одни авторы объясняли наблюдаемые в эксперименте осцилляции интерференцией поляризаций [1], а другие — квантовыми биениями [2]. Еще одним фактором является взаимодействие экситонов между собой. В работах [5-7] указывается, что, при наличии экситон-экситонного взаимодействия, эффект квантовых биений и эффект интерференции поляризаций в четырех-волновом смешении неотличимы. Показательным экспериментом может быть резонансное возбуждение одного из экситонных состояний. В работе [8], при исследовании дифференциального спектра поглощения, было показано, что при накачке только тяжелого экситона сдвигается также уровень легкого экситона. Авторы интерпретируют этот эффект в терминах межподзонной когерентности в валентной зоне в квантовой яме. Таким образом, вопросы о приро-

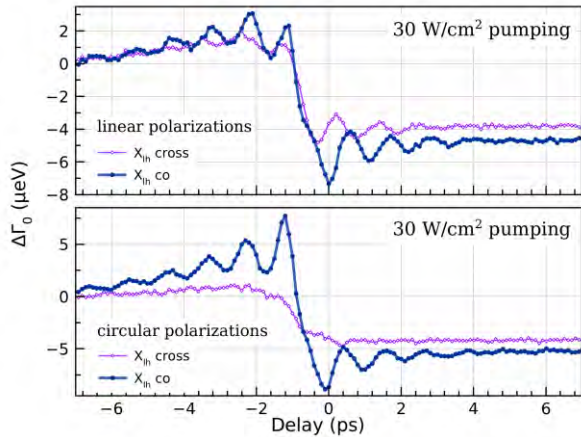
де наблюдаемых осцилляций интенсивности сигнала — квантовые биения или интерференция поляризаций, а также о влиянии экситон-экситонного взаимодействия на наблюдаемый эффект, решены до сих пор не полностью.

В данной работе используется экспериментальная методика накачки-зондирования со спектральным и поляризационным разрешением [9,10]. Такая методика позволяет различить наблюдаемые эффекты с помощью анализа формы экситонных резонансов в рамках теории нелокального диэлектрического отклика [11]. Теоретическое моделирование возможных конфигураций экситонных состояний позволяет определить реальную энергетическую схему экситонных уровней по экспериментальным данным.

## Экспериментальные результаты

Исследовалась квантовая яма GaAs/AlGaAs шириной 14 нм с небольшой концентрацией алюминия (3%) в барьерных слоях. Образец был помещен в криостат замкнутого цикла охлаждения и исследовался при температурах от 4 до 30 К. Особенностью нашей методики накачки-зондирования является измерение полных спектров отражения в различных поляризациях по отношению к поляризации накачки. Спектры обрабатывались с помощью теории нелокального диэлектрического отклика, и из них извлекались такие характеристики состояний тяжелого и легкого экситонов как энергия резонанса, радиационное и нерадиационное уширение. Анализ этих данных позволяет наблюдать биения в динамике всех спектральных характеристик экситонных резонансов.

На рис. 1 показан результат обработки отдельных спектров отражения для каждого значения временной задержки — радиационное уширение легкого экситона. Такой набор экспериментальных данных позволяет отделить эффект квантовых биений от эффектов экситон-экситонного взаимодействия, наложение которых представляло проблему для предыдущих исследований по этой тематике.



**Рис. 1.** Зависимости величины изменения радиационного уширения легкого экситона от временной задержки для линейных (верхняя панель) и циркулярных поляризаций (нижняя панель). Показаны кривые для ко- и кросс-поляризаций детектирования. Температура образца составляла 4 К

## Моделирование

Проведено теоретическое исследование динамики когерентного возбуждения экситонных состояний с легкой и тяжелой дырками. Моделирование проводилось в полуклассической модели, когда электромагнитная волна описывается уравнениями Максвелла, а возбуждаемая экситонная система — квантово-механически. Действие импульса света на систему описывалось оптическими уравнениями Блоха. Были рассмотрены несколько модельных конфигураций исследуемой экситонной системы с различными начальными состояниями. Были проведены расчеты сигнала для экспериментов «накачка-зондирование» в режиме слабой мощности и произведено сравнение с экспериментальными данными по наблюдению квантовых биений экситонных

состояний. Было обнаружено, что расчет для одной из наиболее часто используемых конфигураций с общим начальным состоянием не объясняет эксперимент. Согласие с экспериментом оказалось возможным только для двух из рассмотренных конфигураций, причем более интенсивный отклик системы должен возникать при изначальном попарном смешивании состояний легких и тяжелых дырок ( $+3/2$  с  $+1/2$  и  $-3/2$  с  $-1/2$ ).

Авторы благодарят РФФ за финансовую поддержку в рамках гранта № 19-72-20039 и РЦ «Нанофотоника» СПбГУ за образец для исследования.

## Литература

1. K. Leo, Th. C. Damen, J. Shah et al., *Appl. Phys. Lett.* **57**, 19 (1990).
2. B. F. Feuerbacher, J. Kuhl, R. Eccleston and K. Ploog, *Solid State Commun.* **74**, 1279 (1990).
3. K. Wundke, U. Neukirch, J. Gutowski, and D. Hommel, *Phys. Rev. B* **53**, 10973 (1996).
4. G. Bartels, G. C. Cho, T. Dekorsy et al., *Phys. Rev. B* **55**, 16404 (1997).
5. T. Aoki, G. Mohs, Yu. P. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami, *Phys. Rev. B* **64**, 045212 (2001).
6. M. Phillips, H. Wang, *Solid State Commun.* **111**, 317 (1999).
7. A. L. Smirl, M. J. Stevens, X. Chen, and O. Buccafusca, *Phys. Rev. B* **60**, 8267 (1999).
8. M. E. Donovan, A. Schülzgen, J. Lee et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 237402 (2001).
9. Trifonov A. V., Khramtsov E. S., Kavokin K. V et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 147401 (2019).
10. Trifonov A. V., Kurdyubov A. S., Gerlovin I. Ya. et al., *Phys. Rev. B* **102**, 205303 (2020).
11. E. L. Ivchenko, *Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures* (Springer, Berlin 2004).

# Исследование энергетического положения уровней размерного квантования в множественных квантовых ямах $\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$

Н.Н. Михайлов<sup>1,\*</sup>, В.Я. Алешкин<sup>2</sup>, В.С. Варавин<sup>1</sup>, С.А. Дворецкий<sup>1,3</sup>, В.Г. Ремесник<sup>1</sup>, И.Н. Ужаков<sup>2</sup>, В.А. Швец<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. Ржанова Сибирского отделения РАН, пр. Лаврентьева 13, Новосибирск, Россия, 630090.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>3</sup> Томский государственный университет, пр. Ленина 36, Томск, Россия, 634050.

\*mikhailov@isp.nsc.ru

Экспериментально определено энергетическое положение уровней размерного квантования в выращенных структурах  $\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$  с множественными квантовыми ямами (КЯ) в температурном интервале 77 °–298 К из измерений спектров поглощения и фотопроводимости. Показано, что энергетическое положение уровней размерного квантования в исследуемых структурах существенно зависит от мольного содержания кадмия в КЯ, и на порядок меньше от мольного содержания кадмия в барьерах. Экспериментально показано, что температурная зависимость границы фоточувствительности структур с множественными КЯ полностью аналогично температурному поведению длинноволновой границы фотосопротивлений из объемного материала соответствующего состава. Определена минимальная толщина барьерного слоя, не оказывающая влияние длинноволновую границу фотопроводимости структур с множественными КЯ.

## Введение

Структуры с множественными  $\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$  – перспективный материал для создания как приемников, так и источников ИК излучения, работающих в средневолновой (3-5 мкм), длинноволновой (8°–12 мкм), вплоть до ТГц области спектра [1,2]. Для множественных  $\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$  КЯ энергетическое положение уровней размерного квантования будет зависеть от распределения состава в КЯ (x), толщины КЯ, состава в барьерном слое (y), рабочей температуры как фотоприемника так излучателей. Немногочисленные теоретические работы по определению положения уровней размерного квантования в квантовых ямах на основе теллуридов кадмия и ртути в основном выполнены только для гелиевых температур и КЯ из чистого HgTe. Практически не обсуждается и влияние резкости гетерограниц в структурах, состава и толщины барьеров на энергетическое положение уровней размерного квантования. Экспериментальные результаты в литературе представлены только для сверхрешеток, где существенно влияние туннелирования через барьерные слои и образование мини зон.

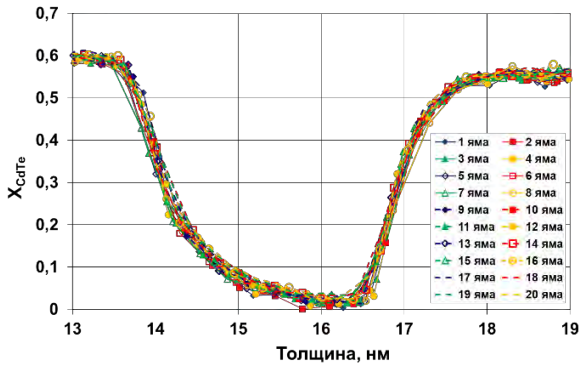
Однако корректных измерений особенностей фотопроводимости для таких структур не было произведено из-за достаточно низкого качества выращенных структур.

## Методика экспериментов и результаты

Для проведения исследований энергетического положения уровней размерного квантования были выращены структуры  $\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$  КЯ на установке МЛЭ “Обь-М” с количеством слоев от 3 до 40 с толщиной КЯ от 2,8 до 12 нм и составом в КЯ  $x \sim (0,03; 0,11)$ . Состав в барьерных слоях составил  $y \sim 0,65 \text{ } ^\circ\text{ } 0,85$  и толщиной 3÷30 нм. Энергетическое положение уровней размерного квантования определялось из измерений спектров поглощения и фотопроводимости в температурном интервале 77÷298 К. Профиль распределения состава в КЯ рассчитывался из *in situ* эллипсометрических измерений с помощью метода “эффеkтивной” подложки [3].

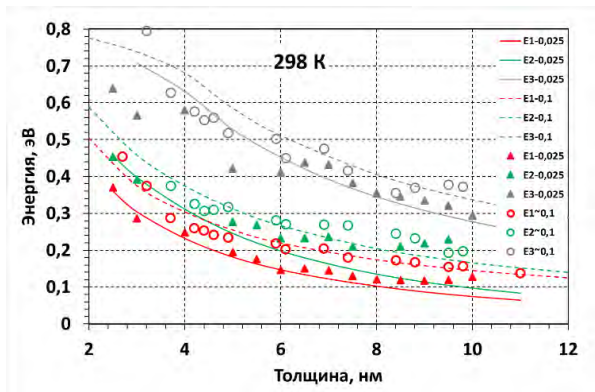
На рис.1 представлен типичный профиль распределения состава для структуры с множественными КЯ. Видно, что наблюдается хорошая воспроизводимость КЯ, что позволило нам провести измерения спектральной зависимости поглощения и фотопроводимости фотосопротивлений, изготовленных из множественных КЯ при температурах 77 °–298 К.

Особенности на спектральной зависимости определяются положением уровней размерного квантования, аналогично тому, как это делалось ранее для сверхрешеток CdTe/HgTe [3].



**Рис. 1.** Типичная зависимость профиля распределения состава в структурах: с множественными  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x \leq 0.025$ ) КЯ (Показано для 20 КЯ). Каждый тип символа соответствует одной КЯ ( $d_{КЯ} \sim 4.1$  нм)

Результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов представлены на рис. 2. Символы – экспериментальные измерения. Сплошные линии – расчетные кривые энергетического положения уровней размерного квантования. Расчет производился на основе модели с использованием Гамильтониана Кейна  $8 \times 8$  в качестве оператора кинетической энергии.

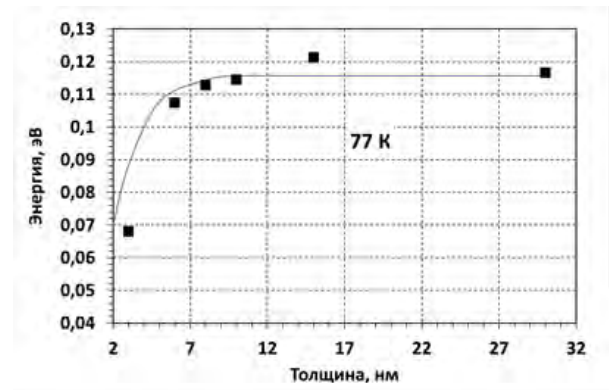


**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости уровней размерного квантования  $E(d)$  от толщины КЯ для структур с  $X_{Hg} = 0,01$  и  $0,025$  и  $X_{бар} = 0,69$  при  $T = 298K$ . Сплошные уровни – теоретическая зависимость

Видно, что энергетическое положение уровней размерного квантования уменьшается на величину  $\sim 0,1eV$  при уменьшении мольного содержания теллурида кадмия в КЯ до чистого  $HgTe$  ( $X_{CdTe} \leq 0,025$ ). Также уменьшение содержания теллурида кадмия барьеров приводит к уменьшению энергии уровней размерного квантования. Зависимости энергетического положения уровней размерного квантования от толщины и состава слоев хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

На следующем рис.3 представлены результаты изменения длинноволновой границы фотопроводимости (уровень  $E_1$ ) от толщины барьерного слоя. Видно,

что заметное изменение длинноволновой границы наблюдается при толщинах барьера менее 6 нм.



**Рис. 3.** Экспериментальная зависимости уровня энергии  $E_1$  (длинноволновой границы) от толщины барьера для структур с  $X_{Hg} \leq 0,025$ ,  $d_{КЯ} \sim 5$  нм и  $X_{бар} = 0,69$  при  $T = 77K$ . Сплошная линия – теоретическая зависимость

### Заключение

Установлена зависимость длинноволновой границы фотосопротивлений от температуры и толщины КЯ, состава слоев  $x$  и барьеров  $y$ . Определена минимальная толщина барьерного слоя, не оказывающая влияние длинноволновую границу фотопроводимости структур с множественными  $Cd_yHg_{1-y}Te/Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_yHg_{1-y}Te$  КЯ. Установлено, что температурное поведение длинноволновой границы фоточувствительности структур с множественными КЯ полностью аналогично температурному поведению длинноволновой границы фотосопротивлений из объемного материала соответствующего состава.

Полученные результаты свидетельствуют, что множественные КЯ как фоточувствительный материал могут составить альтернативу твердому раствору  $CdHgTe$  для создания фотоприёмников в ИК и ТГц спектральных диапазонах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-20053).

### Литература

1. V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov *et al.* // Optical materials Express, V. 8, 320486 (2018).
2. S.V. Morozov, V.V. Rummyantsev *et al.* // ACS Photonics, V.8, №12, 3526-3535 (2021)
3. В.А. Швец, Н.Н. Михайлов и др.// Оптика и спектроскопия, т.127, №2, 318-324 (2019)
4. 1. C.R. Becker, V. Latussek, A. Pfeuffer-Jeschke *et al.* // Physical Review B, V. 65, 10353 (2000).



# Электронные состояния двухзарядных доноров в германии

А.М. Михайлова<sup>1, 2</sup>, А.А. Ревин<sup>1, 2</sup>, А.А. Конаков<sup>1, 2, \*</sup>, В.В. Цыпленков<sup>2</sup>, В.Н. Шастин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603022.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр институт прикладной физики Российской академии наук», ул. Академическая, д. 7, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950.

\*konakov\_anton@mail.ru

В работе в рамках приближения огибающей функции рассчитаны энергии и волновые функции низколежащих  $1s(A_1)$ ,  $1s(T_2)$  состояний донорных центров  $Te^0$ ,  $Te^+$ ,  $Se^0$ ,  $Se^+$ , а также  $2s(A_1)$ ,  $2s(T_2)$ ,  $2p_0$ ,  $2p_x$ ,  $2p_y$ ,  $3p_0$  состояний двухзарядных доноров  $Te^0$ ,  $Se^0$  в германии с учетом короткодействующего потенциала примеси. Последний построен индивидуально для каждого типа примеси. Полученные энергии находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными. Уравнение Шредингера для двухзарядной задачи в случае доноров  $Te^0$ ,  $Se^0$  решалось посредством метода Хартри-Фока, то есть задача была сведена к одночастичной, в случае же однократно ионизированных доноров задача решалась вариационным методом Ритца, как это делалось ранее нами при рассмотрении таких доноров как P, As, Sb.

## Введение

Исследование электронных и оптических свойств примесей в полупроводниках привлекает внимание с середины прошлого века. И если уединенные примесные центры уже нашли свое применение, то двухзарядные доноры (в Si и Ge), будучи более сложными объектами для исследований, изучены меньше, но потенциально могут быть использованы при создании новых электронных приборов, например, источников стимулированного излучения ТГц диапазона, квантовых компьютеров, чему посвящены экспериментальные работы последних лет [1,2]. И если информация о спектре может быть получена экспериментально [3,4], то для исследования динамических процессов необходимо знание волновых функций, которые приходится рассчитывать.

Отметим, что ранее нами был предложен метод расчета электронных состояний однозарядных доноров P, As, Sb в полупроводниковом германии, который учитывает короткодействующую часть примесного потенциала, индуцированный ей химический сдвиг и междолинное взаимодействие [5,6]. На основе результатов, полученных при изучении однозарядных доноров, выполнены исследования для двухзарядных центров. Нами найдены волновые функции, а также энергии основного и нескольких возбужденных состояний двухзарядных центров  $Te^0$  и  $Se^0$  в Ge, где наилучшее согласие с имеющимися экспериментальными данными [3,4] достигается посредством расчетов методом Хартри. В свою очередь резуль-

таты расчетов энергии и волновых функций основного состояния однократно ионизированных донорных центров  $Te^+$ ,  $Se^+$  в германии достигаются путем применения вариационного метода Ритца, как это было представлено в наших более ранних работах для однозарядных доноров [5,6].

## Метод расчета

В ходе работы была поставлена задача поиска энергий и волновых функций электронов, локализованных на двухзарядных донорных центрах  $Te^0$  и  $Se^0$  в полупроводниковом Ge. Переход от двухчастичной задачи к одночастичной осуществлялся с использованием известной процедуры Хартри, при этом решения в случае однозарядных доноров  $Te^+$  и  $Se^+$  рассматривались нами как вспомогательные. Одноэлектронные уравнения решались в приближении огибающей функции, но учитывались короткодействующий потенциал примесного центра и междолинное взаимодействие. Одночастичная задача и для двухзарядных, и для однозарядных центров решается нами вариационным методом, как это делалось для таких доноров как P, As, Sb [6]. Истинная волновая функция была представлена в виде суперпозиции блоховских функций четырех эквивалентных минимумов энергии (электронных долин), где коэффициенты разложения – компоненты огибающей. Затем посредством усреднения по быстро осциллирующим блоховским функциям производился переход к уравнению шредингеровского типа для многокомпонентной огибающей с матричным эффективным гамильтонианом. Матричный гамильто-



ниан разбивался на 2 составляющих: диагональное, описывающее поведение электрона внутри одной долины, и недиагональное, которое моделирует долинно-орбитальное взаимодействие, обусловленное короткодействующей частью потенциала.

Одночастичный гамильтониан в однодолинном приближении имел следующий вид (диагональные элементы четырехкомпонентного гамильтониана):

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_{\perp}} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \gamma \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + V(r) + U(r), \quad (1)$$

где ось  $z$  ориентирована вдоль оси долины,  $m_{\parallel}$  и  $m_{\perp}$  — продольная и поперечная эффективные массы соответственно,  $\gamma = m_{\perp}/m_{\parallel}$ ,  $V(r)$  представляет собой экранированный в длинноволновом пределе водородоподобный потенциал примесного центра (дальнодействующий вклад),  $U(r)$  — короткодействующая часть примесного потенциала (также считается нами для простоты сферически симметричной), связанная с различием в ионных остовах атомов германия и примеси, экранированием в коротковолновом пределе, а также — его модификацией электронными блоховскими функциями в уравнении для огибающей.

Недиагональная часть гамильтониана оказывалась существенной в  $1s$  и  $2s$  состояниях, где огибающие симметризовались по неприводимым представлениям синглета  $A_1$  и триплета  $T_2$ , а долинно-орбитальное взаимодействие учитывалось по теории возмущений. В ходе расчетов основного состояния нами был введен параметр междолинного взаимодействия  $Q$ , который находится аналогично тому, как это делалось для доноров V группы в Ge [6]. Этот же параметр использовался и при расчете расщепления  $2s$  состояния. Сама же одночастичная волновая функция основного состояния имеет вид:

$$\psi(\mathbf{r}) = A \left( \exp \left( -\sqrt{x^2 + y^2 + \beta z^2 / \gamma} / R_1 \right) + C \exp \left( -\sqrt{x^2 + y^2 + \beta z^2 / \gamma} / R_2 \right) \right), \quad (2)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  имеют смысл эффективных радиусов волновой функции,  $C$  — весовой множитель, определяющий «смесь» этих вкладов, и  $\beta$  — вариационный параметр, связанный с анизотропией эффективной массы. Явный вид одночастичных волновых функций возбужденных состояний  $2s$ ,  $2p_0$ ,  $2p_{\pm}$ ,  $3p_0$  можно увидеть в работе [6]. Волновые функции возбужденных состояний строились с учетом ортогональности.

## Результаты и обсуждение

Выполнены расчеты волновых функций низкоэнергетических  $1s(A_1)$ ,  $1s(T_2)$ ,  $2s(A_1)$ ,  $2s(T_2)$ ,  $2p_0$ ,  $2p_{\pm}$ ,  $3p_0$  состояний электронов, локализованных на двухзарядных донорных центрах  $Te^0$  и  $Se^0$ , а также волновых функций основного состояния  $1s(A_1)$ ,  $1s(T_2)$  для однократно ионизированных  $Te^+$ ,  $Se^+$  в германии.

Параметры, полученные для функций основного состояния доноров  $Se^0$  и  $Te^0$ , представлены в Таблице 1. Первые два параметра описывают характерный масштаб локализации волновой функции. Сопоставляя параметры волновой функции основного состояния двухзарядных и однозарядных центров [5,6] ( $Te$  с  $Sb$ ,  $Se$  с  $As$  соответственно), заметим, что характерные радиусы волновой функции уменьшаются, что и следовало ожидать, так как каждый электрон чувствует экранированный заряд, который увеличился в пределах от 1 до 2.

**Таблица 1.** Параметры волновой функции основного состояния двухзарядных центров в Ge.

Донор	$R_1$ , нм	$R_2$ , нм	$C$	$\beta$
Ge:Te <sup>0</sup>	3,760	0,367	-1,081	0,343
Ge:Se <sup>0</sup>	1,351	0,124	3,663	0,545

Энергии, рассчитанные с полученными волновыми функциями, согласуются с имеющимися экспериментальными данными как для функции основного состояния, так и для возбужденных состояний [3, 4].

Работа поддержана грантом РФФИ 19-72-20163.

## Литература

1. K.L. Litvinenko *et al.* // Phys. Rev. B, V. 90, P. 115204 (2014).
2. A. DeAbreu *et al.* // Phys. Rev. Applied, V. 11, P. 044036 (2019).
3. C.S. Olsen *et al.* // Solid State Communications, V. 108, P. 895 (1998).
4. H.G. Grimmeiss *et al.* // Phys. Rev. B, V. 37, P. 6916 (1988).
5. А.А. Ревин, А.М. Михайлова, А.А. Конаков, В.Н. Шагин // ФТП, Т. 54, С. 938 (2020).
6. А.А. Ревин, А.М. Михайлова, А.А. Конаков, В.В. Цыпленков, В.Н. Шагин // ФТП, Т. 55, С. 901 (2021).

# Модификация электронных свойств поверхности $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ вызванная адсорбцией адатомов Cr

А.Н. Михалюк<sup>1,2\*</sup>, Л.В. Бондаренко<sup>2</sup>, А.Ю. Тупчая<sup>2</sup>, Т.В. Утас<sup>2</sup>, Д.В. Грузнев<sup>2</sup>, С.В. Еремеев<sup>3</sup>, А.В. Зотов<sup>2</sup>, А.А. Саранин<sup>2</sup>

1 Институт наукоёмких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950.

2 Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041.

\*mih-alexey@yandex.ru

Исследована электронная структура поверхности  $\alpha\text{-Au/Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}$  модифицированная адсорбцией адатомов Cr. Атомы Cr проникают в металлический слой рассматриваемой поверхности, вызывая появление плоских зон магнитного резонанса в спектре ниже уровня Ферми, что установлено при помощи фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и расчетов согласно теории функционала плотности. Мы раскрываем взаимосвязь между концентрацией магнитных примесей и результирующим воздействием на структуру электронного спектра, а так же раскрываем характер гибридизации между состояниями магнитного резонанса атомов Cr и поверхностными состояниями атомов Au со спиновым расщеплением Рашба. Полученный материал может найти практическое применение в устройствах нанoeлектроники, а электронные явления исследованные на его примере могут выступить базой для дизайна и синтеза новых перспективных двумерных магнитных материалов и фаз с высокой корреляцией электронов.

## Введение

Тонкие атомные слои золота, упорядоченные на поверхностях полупроводников за последние десятилетия стали предметом высокого интереса как в прикладной, так и в фундаментальной физике ввиду перспективных электронных свойств, а так же квантовых эффектов дающих перспективу для их использования в микроэлектронике и спинтронике.

Один из таких примеров поверхность  $\text{Si}(111)5\times 2\text{-Au}$ , представляющая собой массив самоорганизованных квази-одномерных атомных цепочек, где реализуются такие эффекты как управляемый спиновый транспорт, барьеры Шотки атомного масштаба, одномерные перестраивания доменных стенок.

Другой яркий пример это система  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ , представляющая собой двумерный слой золота упорядоченный в виде системы тримеров связанных в виде сотовой решётки и имеющей  $C3$  симметрию. Установлено, что данная система демонстрирует гигантский эффект Рашбы, а в присутствии других тяжёлых металлов (Bi, Tl, In, Pb, Sb) система проявляет свойства двумерного топологического изолятора.

## Результаты и обсуждение

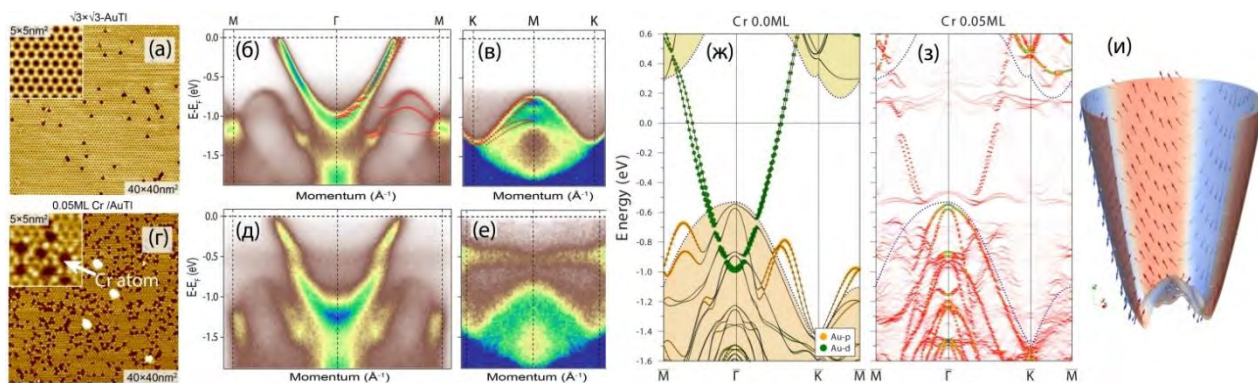
В данной работе исследуется влияние магнитной примеси на электронные свойства системы

$\alpha\text{-Au/Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ , где роль магнитных примесей играют адатомы Cr. Опираясь на недавние экспериментальные наблюдения успешного роста такой магнитно-допированной системы [1], мы предприняли комбинированное экспериментальное и теоретическое исследование, и изучили новые электронные эффекты, уделив особое внимание анализу характера гибридизации между индуцированными хромом локализованными резонансными состояниями. Адсорбция небольшого количества атомов хрома (порядка 0.05 монослоя) приводит к значительной модификации электронных свойств поверхности  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ . В отличие от множества других допатов, таких как In, Tl, Cs, Na создающих тонкий атомный слой поверх золотой поверхности, и приводящих к линейному сдвигу уровня Ферми, атомы Хрома встраиваются в саму кристаллическую решётку (а не оседают на поверхности), и создают значительную модификацию структурных и электронных свойств - в зонном спектре возникает плоская зона (порождённая d-орбиталями Хрома), которая гибридизируется с металлической спин-расщеплённой Рашбовской зоной золота, и вдобавок индуцирует раскрытие диэлектрической щели с небольшим магнитным расщеплением.

Особенности гибридизации магнитной примеси с золотыми поверхностными состояниями, зонная и спиновая текстура, а так же другие электронные

эффекты модифицированной системы и их практическая значимость – предмет исследования данной работы.

Вычисления проводились с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>).



**Рис. 1.** Структурные и электронные свойства поверхности Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au/Cr. (а,г) СТМ изображения высокого разрешения золотой поверхности до и после адсорбции атомов хрома; (б,в) и (д,е) – сравнение спектров ФЭС с угловым разрешением. На панелях (д,е) чётко видна резонансная d-зона хрома (на уровне -0.5eV от уровня Ферми), пересекающая параболическую зону золота, а из спектров посчитанных согласно теории функционала плотности (ж,з,и) можно извлечь детали электронной структуры (орбитальный состав, спиновое и магнитное расщепление)

## Литература

1. A.V. Matetskiy, N.V. Denisov, D.V. Gruznev *et al.* // Physical Review B, V. 102, 195113 (2020).

# Генерация пикосекундных импульсов деформации при сверхбыстром структурном фазовом переходе в тонких плёнках $\text{VO}_2$

Я.А. Могунов<sup>1,\*</sup>, S. Lysenko<sup>2</sup>, А.Е. Федянин<sup>1</sup>, F. Fernández<sup>2</sup>, A. Rúa<sup>2</sup>, A.J. Kent<sup>3</sup>, А.В. Акимов<sup>3</sup>, А.М. Калашникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Puerto Rico, Mayagüez, 00681, Puerto Rico, USA.

<sup>3</sup> School of Physics and Astronomy, The University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, United Kingdom.

\*mogunov@mail.ioffe.ru

Деформация с амплитудой до  $1.6 \cdot 10^{-2}$  была сгенерирована на пикосекундной временной шкале за счёт сверхбыстрого лазерно-индуцированного структурного фазового перехода первого рода в опто-акустическом преобразователе на основе  $\text{VO}_2$ . Фазовый переход привёл к нетермической генерации деформации амплитудой  $+4.5 \cdot 10^{-3}$ , что для оптимизированных условий превосходит все термические механизмы генерации вместе взятые. При этом вклад фазового перехода привёл к троекратному уменьшению нагрева опто-акустического преобразователя, составившему всего 28 К.

## Введение

Пикосекундные импульсы деформации, или волновые пакеты акустических фононов с ГГц-ТГц частотами, сегодня успешно применяются для характеристики механических свойств нанообъектов, таких как двумерные полупроводниковые слои [1] или плёнки сильно-коррелированных оксидов [2]. Эти импульсы также могут выступать фоновым возбуждением для таких объектов, как полупроводниковые квантовые ямы [3] и таких явлений, как сверхбыстрые фазовые переходы в наноструктурах [4]. Пикосекундные импульсы деформации получают конверсией из фемтосекундных лазерных импульсов в опто-акустических преобразователях [5]. Генерация высокоамплитудных пикосекундных импульсов деформации сопряжена с нагревом, что ограничивает достижимые амплитуды единицами  $10^{-3}$  и не позволяет использовать их для возбуждения чувствительных к нагреву объектов, таких как квазидвумерные слои и биологические клетки.

В данной работе [6] мы реализовали подход, позволяющий обойти эти ограничения за счёт применения сверхбыстрого лазерно-индуцированного структурного фазового перехода первого рода, при котором не выделяется тепло.

## Образец и эксперимент

Мы использовали сильно коррелированный оксид  $\text{VO}_2$ , который при нагреве выше 340 К или при воздействии лазерного импульса с плотностью энергии

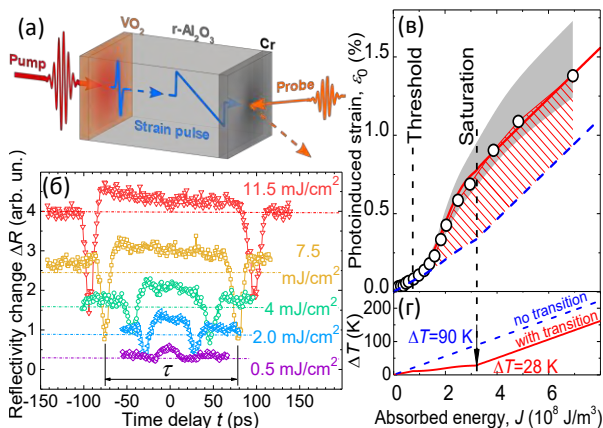
выше определённого порога совершает фазовый переход полупроводник-металл, сопряжённый с изменением кристаллической решётки из моноклинной в тетрагональную [7, 8]. Сопутствующие изменения постоянной решётки составляют  $\sim 1\%$  и происходят на субпикосекундном временном масштабе [8]. При плотности потока энергии выше насыщения, трансформируется весь засвеченный объём материала.

Образец представлял собой эпитаксиальную плёнку  $\text{VO}_2$  толщиной 100 нм, выращенную методом импульсного лазерного осаждения на подложке  $(012)\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 290 мкм, см. Рис. 1(а). Эпитаксиальное соотношение для моноклинной фазы  $\text{VO}_2$ :  $(100)_{\text{VO}_2} \parallel (012)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ . С противоположной стороны подложки была напылена поликристаллическая плёнка хрома толщиной 30 нм.

Эксперименты проводились по методике накачка-зондирование, см. Рис. 1(а). Использовался фемтосекундный лазерный усилитель с рабочим телом  $\text{Yb:KGW}$  (длина волны 1030 нм, длительность импульса 170 фс, энергия в импульсе до 1 мДж). Импульсы накачки были направлены на плёнку  $\text{VO}_2$ , вызывая генерацию импульса деформации и сверхбыстрый фазовый переход. Прошедший через подложку импульс деформации детектировался в плёнке  $\text{Cr}$  по изменению отражения импульса зондирования за счёт фотоупругого эффекта. Разрешение по времени обеспечивалось стробоскопическим эффектом при изменении временной задержки  $t$  между импульсами накачки (и, следовательно, импульсами деформации) и зондирования.

## Результаты и обсуждение

Измеренные отклики на импульсы деформации показаны на Рис. 1(б). Видно, что с ростом лазерного возбуждения увеличивается длительность отклика  $\tau$ . Это обусловлено влиянием акустической нелинейности на распространение импульса деформации в сапфировой подложке [9] (трансформация импульса показана на Рис. 1(а)). Смоделировав этот эффект, мы связали значение  $\tau$  с амплитудой фотогенерируемой в  $\text{VO}_2$  деформации,  $\varepsilon_0$ . Сравнение с результатом эксперимента позволило нам получить зависимость  $\varepsilon_0$  от значения лазерной энергии, поглощённой в  $\text{VO}_2$  (Рис. 1(в)).



**Рис. 1.** (а) Схема эксперимента; (б) Детектируемые временные эволюции изменения отражения Cr; (в) Амплитуда фотогенерируемой деформации в плёнке  $\text{VO}_2$  в зависимости от поглощённой лазерной энергии, заштрихованная область – вклад сверхбыстрого фазового перехода; (г) Сопутствующий нагрев плёнки  $\text{VO}_2$  с вкладом сверхбыстрого фазового перехода (сплошная линия) и без него (пунктирная)

В фотогенерацию деформации вносят вклад термоупругий эффект и деформационный потенциал [10], их сумма показана пунктирной линией на Рис. 1(в). Оставшийся вклад (заштрихованная область) происходит от сверхбыстрого фазового перехода. Этот вклад проявляется только при возбуждении  $\text{VO}_2$  выше порога и достигает  $+4.5 \cdot 10^{-3}$  при уровне возбуждения, превышающем насыщение фазового перехода. Данное значение сравнимо с суммарным действием двух других вкладов в генерацию импульса деформации, и в 3 раза превышает вклад чисто термоупругого эффекта, традиционно используемого в пикосекундной акустике [5, 10]. Максимальная амплитуда деформации в  $\text{VO}_2$ , сгенерированной в наших экспериментах за счёт всех вкладов, достигала  $1.6 \cdot 10^{-2}$ , и была сопоставима с рекордными значениями в литературе  $\sim 4 \cdot 10^{-2}$  [11].

Поскольку на фазовый переход первого рода расходуется энергия, равная скрытой теплоте, то связанный с переходом вклад в генерацию деформации не сопровождается рассеянием тепла, в отличие от других вкладов [10]. Это позволяет осуществить генерацию деформации высокой амплитуды  $8 \cdot 10^{-3}$  с сопутствующим нагревом всего на 28 К. Та же деформация в  $\text{VO}_2$  без вклада от фазового перехода приведёт к втрое большему нагреву (см. Рис. 1(г)).

## Выводы

Таким образом, нами был продемонстрирован новый метод генерации пикосекундных импульсов деформации с высокой амплитудой и уменьшенным нагревом, который позволит применять пикосекундную акустику в качестве сверхбыстрого фонованого возбуждения чувствительных к нагреву образцов на нанометровом и пикосекундном масштабах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-02-00938 А.

## Литература

1. J.D.G. Greener *et al.* // *Physical Review B*, V. 98, 075408 (2018).
2. Ia.A. Mogunov *et al.* // *Physical Review Materials*, V. 4, 125201 (2020).
3. A.V. Scherbakov *et al.* // *Physical Review Letters*, V. 99, 057402 (2007).
4. Ia.A. Mogunov *et al.* // *Physical Review Applied*, V. 11, 014054 (2019).
5. C. Thomsen *et al.* // *Physical Review B*, V. 34, 4129 (1986).
6. Ia.A. Mogunov *et al.* // *Nature Communications*, V. 11, 1690 (2020).
7. D. Wegkamp, J. Stähler // *Progress in Surface Science*, V. 90, 464 (2015).
8. A. Cavalleri *et al.* // *Physical Review Letters*, V. 87, 237401 (2001).
9. P.J.S. van Capel, J.I. Dijkhuis // *Physical Review B*, V. 81, 144106 (2010).
10. P. Ruello, V.E. Gusev // *Ultrasonics*, V. 56, 21 (2015).
11. P.J.S. van Capel *et al.* // *Physical Review B*, V. 84, 085317 (2011).

# Терагерцевые плазмоны в графене с постоянным током, направленным перпендикулярно распространению плазмонов

И.М. Моиссенко<sup>1\*</sup>, Д.В. Фатеев<sup>1,2</sup>, В.В. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им В. А. Котельникова РАН, ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019.

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012.

\* MoiseenkoIM@yandex.ru

Теоретически исследовано падение терагерцевой электромагнитной волны с ТЕ поляризацией на структуру, состоящую из двух слоёв гидродинамического графена с постоянным электрическим током, направленным перпендикулярно волновому вектору падающей волны. Показано, что в такой структуре возможно возбуждение и усиление плазмонов в ТГц диапазоне частот. Выяснено, что за счет наличия дрейфа носителей заряда в слоях графена действительная часть проводимости графена становится отрицательной. Это приводит к усилению плазмонов и лазерному излучению в терагерцевом диапазоне частот.

## Введение

Графен за счет своих уникальных свойств является перспективным материалом для создания усилителей, генераторов и детекторов терагерцевого (ТГц) излучения, работающих на эффекте плазмонного резонанса [1, 2]. При решении задач электродинамики графен описывается динамической проводимостью. Проводимость графена может быть получена путем решения гидродинамических уравнений в случае, когда частота межэлектронных столкновений в графене превышает частоту рассеяния импульса носителей заряда на фононах и примесях [3]. Важной особенностью графена является возможность усиления ТГц излучения за счет создания в графене отрицательной проводимости различными методами. В графене с постоянным током плазмонное усиление может быть достигнуто за счет эффекта Черенкова, когда фазовая скорость плазмонов меньше скорости дрейфа электронов в графене [4].

В случае, когда фазовая скорость ТГц волны превышает скорость дрейфа электронов в графене также возможно усиление в случае постоянного тока, сонаправленного с направлением распространения плазмонов в графене. Такое усиление вызвано передачей энергии постоянного тока ТГц волне через рассеяние на неоднородностях кристаллической решетки графена [5].

## Результаты и обсуждение

Рассматриваемая структура состоит из двух слоев допированного графена с постоянным электрическим током, вызванным постоянным полем. Слои графена отделены слоем диэлектрика конечной толщины и покрыты диэлектрическими обкладками (Рис.1). Чтобы исключить влияние диэлектрических сред на исследуемый эффект усиления, диэлектрические проницаемости всех сред полагаются равными  $\epsilon_j = 4.5$ , где  $j=1,2,3$  – номер среды. На графеновую структуру падает ТГц электромагнитная волна с ТЕ-поляризацией под произвольным углом в плоскости XY (Рис. 1).

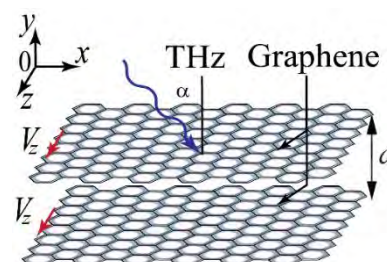


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры

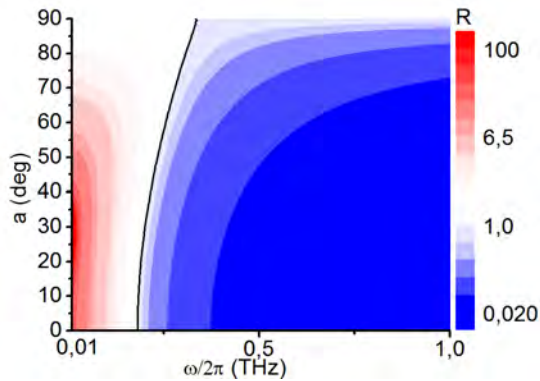
Тангенциальная компонента волнового вектора падающей ТГц-волны записывается как  $k_x = \omega \sqrt{\epsilon_1} \sin \alpha / c$ , где  $\omega$  и  $\alpha$  – круговая частота ТГц волны и угол падения, соответственно,  $c$  – скорость света.



В направлении  $Oz$  все величины полагаются однородными. Направление постоянного тока перпендикулярно тангенциальной компоненте волнового вектора падающей волны (вдоль оси  $Oz$  на Рис. 1).

В настоящей работе оба слоя графена описываются проводимостью  $\sigma$ , полученной в рамках гидродинамического приближения. Для этого были решены уравнения баланса импульса и энергии носителей заряда, а также уравнение непрерывности [4]. Электронный дрейф в графене приводит к появлению пространственной дисперсии проводимости гидродинамического графена благодаря силам давления в гидродинамической электронной жидкости, а также влиянию эффекта Доплера в графене.

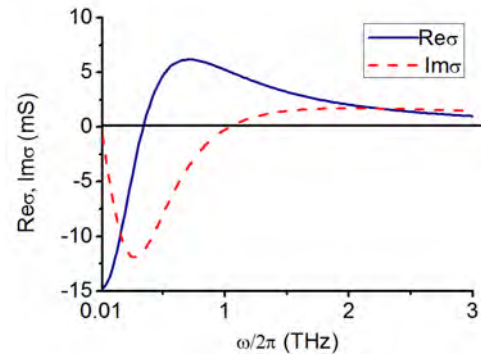
При величине постоянного тока в графене  $V_z=0.7V_F$ , где  $V_F=10^6$  м/с – скорость Ферми в графене, и времени релаксации импульса носителей заряда 0.3 пс, коэффициент отражения падающей на структуру волны может превышать единицу в ТГц диапазоне (Рис. 2), что означает возможность усиления в этом частотном диапазоне. Максимальная час-



**Рис. 2.** Спектр отражения ТГц волны в зависимости от угла падения волны на двухслойную графеновую структуру. Величина энергии Ферми в слоях графена 100 мэВ

тота усиления ( $R>1$ ) определяется областью частот, где выполняется условие  $\text{Re } \sigma < 0$  (сплошная кривая на рис. 3). Для указанных выше скорости дрейфа и времени релаксации импульса электронов в графене верхняя частота, при которой  $\text{Re } \sigma < 0$  составляет 0.3 ТГц при угле падения, близком к  $90^\circ$ . При угле падения  $\sim 30^\circ$  коэффициент отражения превышает величину 100, что говорит о лазерном излучении из графена. Лазерное излучение получено вблизи диапазона возбуждения ТЕ плазмонного резонанса. Для возбуждения ТЕ плазмонов необходим емкостной характер проводимости графена, что соответствует условию  $\text{Im } \sigma < 0$  [6]. Как видно из рис. 3, проводимость графена с постоянным током может быть емкостной на частотах ниже 1 ТГц. При этом

на частотах выше 1 ТГц проводимость графена индуктивна, что говорит в возможности возбуждения ТМ плазмонов на этих частотах.



**Рис. 3.** Действительная (сплошная кривая) и мнимая (пунктирная кривая) части проводимости графена в зависимости от частоты при скорости дрейфа электронов в графене  $V_z=0.7V_F$ . Время релаксации импульса носителей заряда в графене составляет 0,3 пс

Таким образом, найдет диапазон усиления и возбуждения ТЕ плазмонов электромагнитной волной, падающей на структуру, состоящую из двух слоёв гидродинамического графена с постоянным электрическим током, направленным перпендикулярно волновому вектору падающей волны. Показана возможность лазерного излучения ТЕ электромагнитной волны вблизи диапазона возбуждения ТЕ плазмонов в ТГц диапазоне.

Работа финансирована стипендией Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

## Литература

1. F. H. L. Koppens, T. Mueller, P. Avouris, A. C. Ferrari, M. S. Vitiello and M. Polini, *Nature Nanotech* **9**, 780 (2014).
2. T. Watanabe, T. Fukushima, Y. Yabe, S. A. Boumbanga Tombet, A. Satou, A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin, V. Mitin, V. Ryzhii, and T. Otsuji, *New J. Phys.* **15**, 075003 (2013).
3. D. Svintsov, *Phys. Rev. B* **97**, 121405(R) (2018).
4. D. Svintsov, *Phys. Rev. B* **100**, 195428 (2019).
5. I. M. Moiseenko, V. V. Popov, and D. V. Fateev, *Phys. Rev. B* **103**, 195430 (2021).
6. S.A. Mikhailov and K. Ziegler, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 016803 (2007).

# Сильная экситон-плазмонная связь в структурах с таммовским плазмоном и экситоном в органическом материале

К.М. Морозов<sup>1,\*</sup>, А.В. Белоновский<sup>2</sup>, Е.И. Гиршова<sup>1,2</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, ул. Хлопина, 8/3, Санкт-Петербург, 194021.

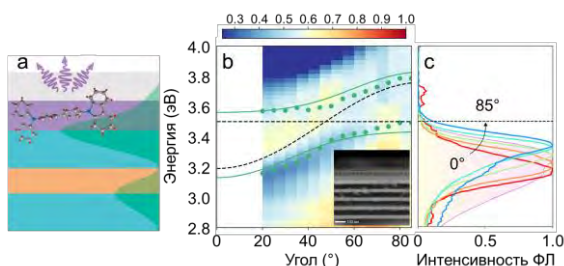
<sup>2</sup> Университет ИТМО, Кронверкский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101.

\*morzconst@gmail.com

Были теоретически и экспериментально исследованы образцы микрорезонаторов на основе распределенных брэгговских отражателей, органических материалов СВР и DPAVBi а также металлического слоя. В исследованных образцах наблюдался режим сильной и ультрасильной связи между плазмонной модой и экситоном в органическом материале.

## Введение

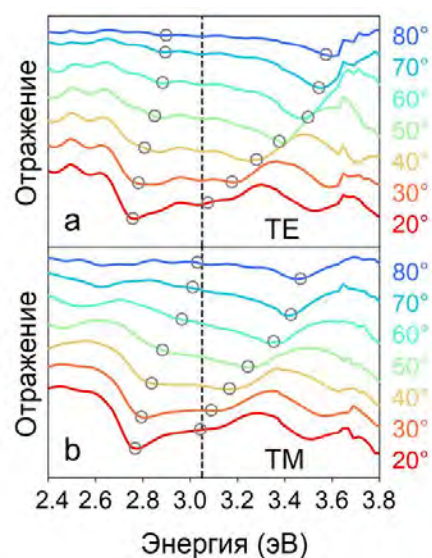
Гибридные плазмонно-органические структуры, например структуры с таммовским плазмоном и органическим светоизлучающим материалом таким как СВР [1] или DPAVBi [2] открывают новые возможности источников света и детекторов, в том числе в ближнем УФ-спектральном диапазоне. Вследствие большой силы осциллятора в органических материалах, реализация сильной (ультрасильной [3,4]) связи между плазмоном и экситоном возможна в плазмонно-органических структурах при комнатной температуре. Интересной особенностью органических материалов является большая величина стока сдвига, сравнимая с расщеплением Раби между экситоном и плазмоном. Это может приводить к ряду интереснейших явлений, в том числе к особому поведению поляризационного расщепления поляритонных мод [5].



**Рис. 1.** (а) Схема структуры с ТП и органическим материалом. (б) Распределение коэффициента отражения от структуры с СВР. Зеленые кружки и кривые – дисперсии поляритонных мод. На вставке – РЭМ изображение структуры с СВР. (с) Спектры ФЛ в зависимости от угла

Были изготовлены структуры на основе брэгговского отражателя ( $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), органического материала (СВР, который излучает в ультрафиолето-

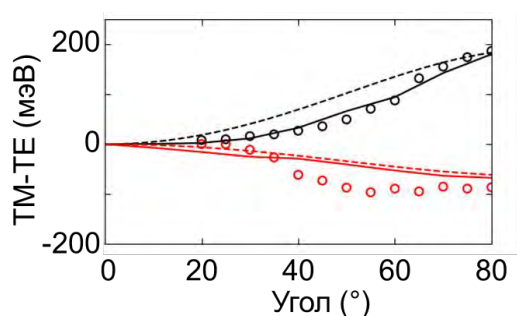
вой спектральной области или DPAVBi, который излучает в видимом диапазоне), и слоя серебра (рис. 1а).



**Рис. 2.** Кривые - спектры отражения с угловым разрешением для TE (а) и TM (б) поляризаций структуры с DPAVBi. Кружки – результат аппроксимации спектров

В случае структуры с СВР сильная связь между таммовским плазмоном (ТП) и экситоном наблюдается в ультрафиолетовой области, несмотря на существенное поглощение света в слое серебра (рис. 1 б, с). Интересной особенностью СВР является стока сдвиг, сравнимый с расщеплением Раби. Картина люминесценции в таком режиме может быть интерпретирована следующим образом: «поглощающий экситон» в СВР взаимодействует с таммовским плазмоном в режиме сильной связи и формирует поляритонные моды, после чего происходит эмиссия света «излучающим эксито-

ном», взаимодействующим с поляритонной модой в режиме слабой связи.



**Рис. 3.** Угловая зависимость TM-TE расщепления для нижней (черный цвет) и верхней (красный цвет) поляритонных мод для структуры с 40 нм-слоем DPAVBi. Кружки — эксперимент, штриховая и сплошная кривые — аналитическая и численная модели, соответственно

В структурах с DPAVBi наблюдается режим ультрасильной связи, с антипересечением поляритонных мод в TE и TM поляризации (рис. 2). При этом расщепление TE и TM- поляризованных мод для

верхней и нижней поляритонных ветвей имеет разный знак (рис. 3). В резонаторах других типов такой эффект ранее не наблюдался.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-22-00731).

## Литература

1. K.M. Morozov, K.A. Ivanov, A.V. Belonovski *et al.* // *J. Phys. Chem. C*, V. 124, 21656–21663 (2020).
2. K.M. Morozov, P Pander, L.G. Franca *et al.* // *J. Phys. Chem. C*, V. 125, 8376–8381 (2021).
3. M. Mazzeo, A. Genco, S. Gambino *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 104, 233303 (2014).
4. S. Gambino, M. Mazzeo, A. Genco *et al.* // *ACS Photonics* V. 1, 1042–1048 (2014).
5. G. Panzarini, L. C. Andreani, A. Armitage *et al.* // *Phys. Rev. B* V. 59, 5082–5089 (1999).

# Терагерцовые плазмоны в желобковом волноводе с графеном: характеристики и возможность возбуждения

М.Ю. Морозов, В.В. Попов

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия.

\*mikkym@mail.ru

Численно исследована дисперсия терагерцовых плазмонов в желобковом волноводе с графеном. Показана, возможность реализации условия равенства продольных и поперечных относительно волновода тангенциальных к графену волновых чисел плазмонной и электромагнитной волн, что является одним из необходимых условий для возможности возбуждения плазмонной моды в графене с помощью электромагнитной волны.

## Введение

Для возбуждения плазменных волн (плазмонов) в графене предложен ряд способов, которые можно разделить на два основных метода. Первым методом предполагается возбуждение плазмонов с помощью дифракции падающей электромагнитной волны на решетке, расположенной вблизи графена [1]. Вторым методом – это возбуждение плазмонов с помощью нарушенного полного внутреннего отражения в призме с большой диэлектрической проницаемостью [2, 3]. Оба метода характеризуются рядом преимуществ, так и некоторыми недостатками. В первом методе дифракция на решетке приводит к возникновению плазменных волн с волновыми векторами, направленными в двух противоположных направлениях в плоскости, перпендикулярной полоскам решетки. В результате с помощью первого метода можно эффективно возбудить стоячую плазменную волну в графене, а возбудить бегущую волну в структуре с симметричной элементарной ячейкой нельзя, а возможно только в структуре с асимметричной элементарной ячейкой [4] с геометрически сложным затвором из двух подрешеток. При возбуждении плазмонов с помощью призмы (второй метод) можно возбудить бегущий плазмон, но для возбуждения плазмонов с большими волновыми векторами необходимы призмы с достаточно большой величиной диэлектрической проницаемости.

В настоящей работе теоретически изучаются основные характеристики и возможность возбуждения быстрых бегущих продольно электрических (longitudinal electric – LE) терагерцовых (ТГц) плазмонов в желобковом металлическом волноводе с графеном. Графен, нанесенный на диэлектрическую

подложку, помещен в прямоугольную канавку конечной ширины и бесконечной глубины в металле (рис. 1). Фактически, выше графена находится пустой плоскопараллельный металлический волновод.

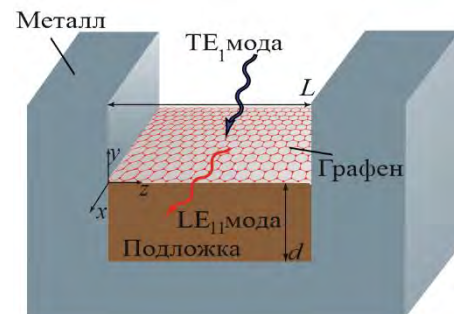


Рис. 1. Схематическое представление структуры

## Теоретическая модель

Для численного исследования дисперсии и характеристик LE плазмонов в рассматриваемой структуре в строгом электродинамическом подходе было получено следующее дисперсионное соотношение

$$k_{y,c} + k_{y,s} \operatorname{cth}(ik_{y,b}d) = \omega \mu_0 \sigma; k_{y,s,c} = \sqrt{k_x^2 + k_z^2 - \varepsilon_{b,c} k_0^2} \quad (1)$$

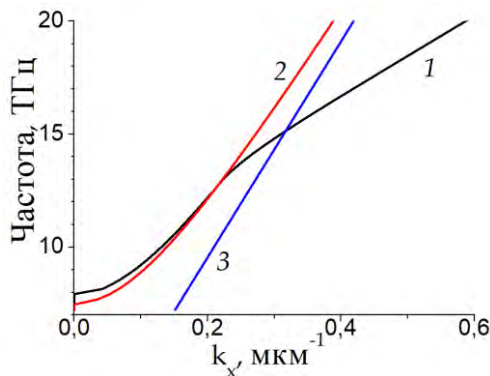
где  $\omega$  – круговая частота волны,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\sigma$  – динамическая проводимость графена [5],  $d$  – толщина подложки, отделяющей графен от дна желоба,  $k_0 = \omega/c$  ( $c$  – скорость света) – волновое число света в вакууме,  $k_{y,s,c}$ ,  $k_x$ ,  $k_z = \pi m/L$  ( $L$  – ширина желобкового волновода,  $m$  – натуральное число) – соответственно нормальные к графену компоненты волнового вектора плазмона в подложке (индекс s) и в среде над графеном (индекс c) и тангенциальные к графену компоненты волнового вектора,  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_c = 1$  – соответственно относительные диэлектрические проницаемости подложки и среды над графеном. Потери энергии носителей заряда в графене не учи-



тываются. Расчеты выполнены при  $\varepsilon_s = 5$  (что соответствует нитриду бора – hBN),  $L = 20$  мкм,  $d = 3$  мкм.

### Дисперсия и характеристики LE моды плазмонов в желобковом волноводе с графеном

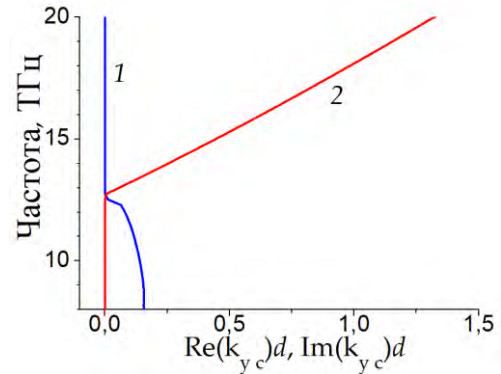
На рис. 2 представлена дисперсия LE<sub>11</sub> моды ТГц плазмонов в желобковом волноводе с графеном (кривая 1), TE<sub>1</sub> моды (кривая 2) и TEM электромагнитной волны (кривая 3) в плоскопараллельном металлическом волноводе над графеном. Первый индекс 1 для LE<sub>11</sub> моды и индекс TE<sub>1</sub> моды характеризует структуру поля волн поперек желоба и означает, что по ширине желоба укладывается половина длины волны. Вторым индексом LE<sub>11</sub> моды, описывающий структуру поля плазмона по вертикальной оси в подложке также равен 1, поскольку все расчеты выполнялись при условии  $|k_{y,b}|d < \pi/2$ .



**Рис. 2.** Дисперсия LE<sub>11</sub> моды ТГц плазмонов в желобковом волноводе с графеном (кривая 1), TE<sub>1</sub> моды (кривая 2) и TEM электромагнитной волны (кривая 3) в плоскопараллельном металлическом волноводе над графеном

Из рис. 2 видно, что на высоких частотах дисперсия LE<sub>11</sub> моды ТГц плазмонов близка к линейной и длина компоненты волнового вектора  $k_x$  превосходит соответствующие компоненты волновых векторов TE<sub>1</sub> и TEM мод плоскопараллельного металлического волновода. На малых частотах LE<sub>11</sub> мода становится быстрой, и ее дисперсия пересекает дисперсии TE<sub>1</sub> и TEM мод. Таким образом, при определенном выборе значений параметров, реализуется условие равенства продольных (вдоль желобка,  $k_x$ ) и поперечных ( $k_z$ ) волновых чисел LE<sub>11</sub> и TE<sub>1</sub> мод, что является одним из необходимых условий для связи LE<sub>11</sub> и TE<sub>1</sub> мод и возможности возбуждения LE<sub>11</sub> моды плазмонов в графене с помощью TE<sub>1</sub> моды электромагнитной волны.

Отметим, что при пересечении дисперсий LE<sub>11</sub> и TE<sub>1</sub> мод, меняется характер LE<sub>11</sub> моды. На рис. 3 показаны действительная (кривая 1) и мнимая (кривая 2) части нормальной к плоскости графена компоненты волнового вектора  $k_{yc}$ . Видно, что на больших частотах LE<sub>11</sub> мода является поверхностной неизлучающей волной, а при уменьшении частоты после пересечения с TE<sub>1</sub> модой становится излучающей модой.



**Рис. 3.** Действительная (кривая 1) и мнимая (кривая 2) части нормальной к плоскости графена компоненты волнового вектора  $k_{yc}$ . LE<sub>11</sub> моды ТГц плазмонов в желобковом волноводе с графеном, нормированная на толщину подложки

Таким образом, в настоящей работе теоретически изучена дисперсия LE<sub>11</sub> моды ТГц плазмонов в желобковом волноводе с графеном. Показано, что можно реализовать условие равенства продольных  $k_x$  и поперечных  $k_z$  волновых чисел LE<sub>11</sub> и TE<sub>1</sub> мод, что является одним из необходимых условий для возможности возбуждения LE<sub>11</sub> моды плазмонов в графене с помощью TE<sub>1</sub> моды плоскопараллельного металлического волновода над графеном. Связь LE<sub>11</sub> и TE<sub>1</sub> мод подтверждается возникновением излучения LE<sub>11</sub> моды из желобкового волновода при пересечении ее дисперсии с дисперсией TE<sub>1</sub> моды плоскопараллельного металлического волновода.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### Литература

1. W. Gao, *et al.* // Nano Lett., 13 3698-702 (2013).
2. A. Otto // Z. Phys., 216, 398-410 (1968).
3. E. Kretschmann and H. Raether // Z. Naturforsch. A, 23, 2135 (1968).
4. D.V. Fateev, *et al.* // Phys. Rev. Applied 11, 064002 (2019).
5. A.A. Dubinov, *et al.* // J. Phys.: Condens. Matter, V. 23, 145302 (2011).

# Влияние оже-рекомбинации, модовых потерь и разогрева носителей на критическую температуру генерации стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в диапазоне 3–31 мкм

С.В. Морозов<sup>1, 2, \*</sup>, В.В. Уточкин<sup>1, \*</sup>, М.А. Фадеев<sup>1</sup>, В.В. Румянцев<sup>1, 2</sup>, К.Е. Кудрявцев<sup>1</sup>, В.И. Гавриленко<sup>1, 2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>3</sup>, С.А. Дворецкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>3</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*more@ipmras.ru

В работе обсуждаются факторы, ограничивающие параметры стимулированного излучения (пороговую интенсивность оптического возбуждения и критическую температуру генерации) для гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe среднего ИК и ТГц диапазонов. В работе отдельно рассматриваются коротковолновые (2.5–7 мкм), средневолновые (6–22 мкм) и длинноволновые (20–31+ мкм) структуры из-за разных ключевых факторов, ограничивающих параметры СИ, а также обсуждаются методы преодоления влияния этих факторов в каждом диапазоне.

## Введение

Одной из быстро развивающихся областей физики полупроводников является разработка компактных источников когерентного излучения среднего ИК и ТГц диапазона (3 – 300 мкм). Лучшие параметры лазерной генерации в данном диапазоне имеют квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Однако, существует спектральный диапазон  $\lambda = 20 - 60$  мкм, не покрываемый ККЛ за счет полосы остаточных лучей  $A^{III}V$  полупроводников, на основе которых изготовлено большинство ККЛ. Более того, высокие требования к ростовой технологии и высокая стоимость изготовления препятствуют широкому распространению ККЛ. Межзонные полупроводниковые лазеры представляют собой простую альтернативу ККЛ, и разработка таких лазеров в среднем ИК и ТГц диапазонах остаётся актуальной задачей. Структуры с узкими квантовыми ямами (КЯ) Hg(Cd)Te/CdHgTe являются перспективным кандидатом для излучателей среднего ИК и ТГц диапазонов.

## Исследованные образцы

Все исследованные структуры были выращены методом МПЭ на полуизолирующей GaAs (013) под-

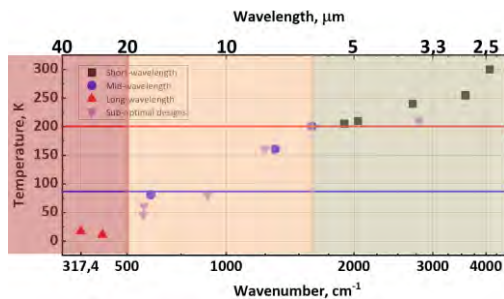
ложке с буферами из ZnTe и CdTe с *in situ* эллипсометрическим контролем состава и толщины слоев. *Ex situ* характеристика структур проводилась при помощи экспресс-методики, описанной в работе [1]. Структуры содержали в активной области массив из узких КЯ с небольшим остаточным содержанием Cd (~6-7% и ниже для структур на диапазон >10 мкм и ~10% для более коротковолновых), толщины КЯ варьировались от 2.7 нм (структуры на диапазон 3 – 5 мкм) до 7.9 нм (20 – 31 мкм). В структурах был реализован градиент показателя преломления обкладочных слоев для эффективной локализации волноведущей моды на длине волны, соответствующей энергии межзонного перехода в КЯ.

Образцы устанавливались на холодный палец оптического гелиевого криостата замкнутого цикла ( $T = 8 - 300$  К). Оптическое возбуждение структур обеспечивалось импульсными CO<sub>2</sub>-лазером и ПГС ближнего ИК диапазона (1.9 – 2.3 мкм). Излучение от образцов заводилось при помощи эллиптического зеркала в ИК фурье-спектрометр Bruker Vertex 80v, работавший в режиме пошагового сканирования. В качестве детекторов использовались HgCdTe приёмники и кремниевый болометр.



## Результаты и обсуждение

Параметры стимулированного излучения (СИ) исследованных структур приведены на рис. 1. Хорошо видно, что критическая температура генерации СИ ( $T_{\max}$ ) падает по мере продвижения в длинноволновый диапазон, и на графике можно выделить три области: коротковолновую (зелёный, 2,5 – 7 мкм), средневолновую (жёлтый, 6 – 22 мкм) и длинноволновую (красный, 20 – 31+ мкм). В то время как  $T_{\max}$  коротковолновых структур лежат в области, доступной для термоэлектрического охлаждения (выше красной линии),  $T_{\max}$  средневолновых структур позволяют использовать жидкий азот для их охлаждения (синяя линия), а  $T_{\max}$  длинноволновых структур лежат ниже температуры жидкого азота.



**Рис. 1.** Параметры стимулированного излучения серии структур с КЯ HgCdTe/CdHgTe. Каждая метка обозначает отдельную структуру, при этом значение абсциссы отвечает волновому числу линии СИ при  $T = 8$  К, а значение ординаты – критической температуре  $T_{\max}$  для данной структуры

Классическая пороговая оже-рекомбинация, а именно ССНС-процесс, является определяющим фактором возможности достижения генерации стимулированного излучения и его параметров, таких как пороговая интенсивность накачки и  $T_{\max}$ , для средневолновых структур. В данной области с хорошей точностью выполняется эмпирическое соотношение  $kT_{\max} = 1/2 \cdot E_{th}$ , где  $E_{th}$  – пороговая энергия ССНС оже-процесса [2, 3]. Улучшение параметров СИ в средневолновых структурах связывается с подбором оптимальных параметров КЯ для максимизации значения  $E_{th}$ .

При переходе в коротковолновую область, за счёт роста  $E_g$ , становятся возможными различные пороговые и беспороговые оже-процессы, специфичные для квантовых ям, а также процессы межподзонного поглощения света, точный учёт которых представляет собой сложную теоретическую задачу [4]. Тем не менее, наиболее вероятным фактором, определяющим критическую температуру  $T_{\max}$  и пороговую

интенсивность накачки, представляется разогрев носителей с ростом мощности возбуждения, сопровождающийся значительным превышением температуры носителей над температурой решётки и невозможностью достижения инверсии населённостей [5]. Улучшение параметров СИ в коротковолновых структурах связывается с подавлением разогрева носителей за счёт перехода к более "холодной" накачке и дизайнам КЯ с низкими обкладками.

В длинноволновой области возможность получения СИ определяется модовыми потерями в пассивных слоях [6]. При продвижении в область длинных волн ( $>20$  мкм), в исследуемых структурах быстро растёт параметр  $\alpha_p/\Gamma$ , где  $\alpha_p$  – коэффициент поглощения в пассивных слоях, а  $\Gamma$  – фактор оптического ограничения. По мере увеличения длины волны, растут показатель преломления и коэффициент поглощения GaAs подложки. Когда показатель преломления GaAs начинает превышать показатель преломления ограничивающего моду CdTe слоя, мода "вытекает" в подложку, что ведёт к резкому росту параметра  $\alpha_p/\Gamma$ . Улучшение параметров СИ в длинноволновых структурах связывается с оптимизацией дизайна диэлектрического волновода – увеличением толщины CdTe буфера или переходом на легированные GaAs подложки, а также увеличением числа КЯ в активной области для улучшения параметра  $\Gamma$  [7].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования (грант № 075-15-2020-906, НИЦМУ "Фотоника").

## Литература

1. С. В. Морозов, В. В. Уточкин, В. В. Румянцев *et al.* // Письма в ЖТФ, 47(3), стр. 51-54 (2021).
2. V. V. Utochkin, K. E. Kudryavtsev, M. A. Fadeev *et al.* // Laser Physics, 31, 015801 (2021).
3. V. Rumyantsev, M. Fadeev, V. Aleshkin *et al.* // Phys. Status Solidi B, 256, 1800546 (2019).
4. K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev *et al.* // Applied Physics Letters, 117, 083103 (2020).
5. K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev, V. V. Utochkin *et al.* // J. Appl. Phys, 130, 214302 (2020).
6. S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev, M. S. Zholudev *et al.* // ACS Photonics, 8, 12, 3526–3535 (2021).
7. В. В. Уточкин, А. А. Дубинов, М. А. Фадеев *et al.* // ФТП, 55(10), стр. 922–926 (2021).

# Планарные емкостные элементы на основе углеродных наностенок

А.М. Мумляков<sup>1,\*</sup>, М.В. Шибалов<sup>1</sup>, Н.В. Порохов<sup>1</sup>, Е.В. Зенова<sup>1</sup>, М.А. Тархов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Ленинский проспект, 32А, Москва, 119991.

\*mumlyakov.a@inme-ras.ru

В данной работе на пластине диаметром 100 мм были изготовлены и исследованы твердотельные квази 3D конденсаторы на основе многослойной структуры: металл-углеродные наностенки (УНС) — диэлектрик — металл. Углеродные наностенки выступали в качестве трехмерного нано-структурированного нижнего электрода. Впервые для таких структур был проведен сравнительный анализ конденсаторов с интегрированными УНС в нижний электрод и без УНС, экспериментально получены основные характеристики: удельная емкость, токи утечки, пробивные напряжения. Максимальная удельная емкость составила 3.6 мкФ/см<sup>2</sup> при толщине AlO<sub>x</sub> 10 нм, что в 4.7 раза превышает значения конденсаторов без УНС.

## Введение

В настоящее время, увеличение количества различных интегральных микроэлектронных устройств способствует развитию качественных пассивных элементов с высокими электрофизическими характеристиками. Одними из таких ключевых элементов являются тонкопленочные планарные конденсаторы. Они применяются для радиочастотной развязки [1], ВЧ-фильтрации [2], во времязадающих цепях [3] и т.д. Конструктивно чаще всего применяется трехслойная структура металл-изолятор-металл (МИМ), состоящая из нижней и верхней обкладок, разделенных слоем диэлектрического материала. Особенностью данных структур является небольшая плотность емкости и большие латеральные размеры. Высокие значения емкости могут быть достигнуты различными методами: использованием диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью [4], уменьшением толщины диэлектрика или увеличением эффективной площади поверхности электрода. Уменьшение толщины диэлектрика и использование диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, приводит к низким пробивным напряжениям и высоким токам утечки структур [5]. Поэтому увеличение эффективной площади поверхности электрода является перспективным направлением развития компактных конденсаторов. Микроконденсаторы с высокими показателями удельной емкости открывают огромные возможности для нового класса устройств с малыми размерами. Общее направление для создания таких устройств с высокой площадью поверхности является трехмерное нано-структурирование одного из электродов.

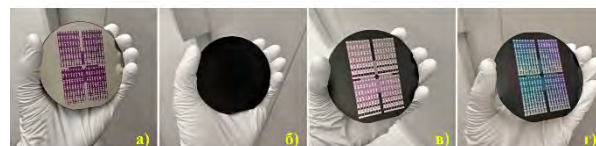
## Эксперимент

В качестве исходных подложек использовались окисленные кремниевые пластины p-типа диамет-

ром 100 мм на которых были сформированы методами лазерной литографии нижние обкладки конденсаторов, состоящие из молибдена и нитрида титана с шестью различными площадями – от 0.015 мм<sup>2</sup> до 4 мм<sup>2</sup> (Рисунок 1а). Синтез углеродных наностенок проводился в реакторе с высокочастотной емкостной-связанной плазмой (Рисунок 1б). В качестве газовых прекурсоров использовалась газовая смесь Ar, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, соотношение расходов 400 sccm:1 sccm:25 sccm, соответственно.

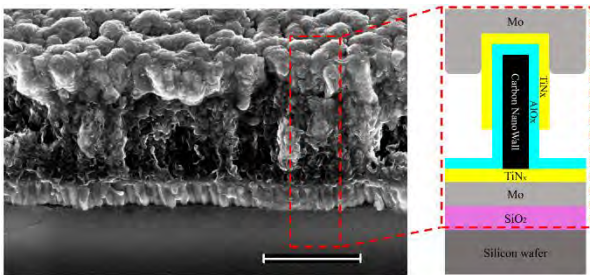
Осаждение диэлектрического слоя AlO<sub>x</sub> производилось методом атомно-слоевого осаждения (ALD) из металлоорганического прекурсора Trimethylaluminum (TMA) и воды (Рисунок 1в). Количество циклов осаждения составило 50, 100, 150 и 200, что равно толщине 5, 10, 15 и 20 нм, соответственно. Верхний электрод состоял из нитрида титана, осажденного на поверхность УНС и молибдена, полученного магнетронным распылением молибденовой мишени (Рисунок 1г). Нитрид титана осаждался методом атомно-слоевого осаждения, усиленного плазмой (PEALD) из металлоорганического прекурсора Tetrakis(dimethylamido)titanium (IV) (TDMAT) и NH<sub>3</sub> в качестве реактанта.

Количество циклов осаждения было постоянным и равным 100, что соответствует толщине 12 нм.



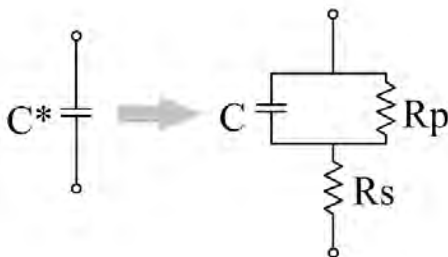
**Рис. 1.** Изображение нескольких технологических этапов изготовления MCNWIM структур. а) Сформированный нижний контакт. б) Синтез УНС. в) Плазмохимическое травление УНС и осаждение AlO<sub>x</sub>. г) Сформированный верхний контакт

СЭМ изображение скола квази 3-D структуры металл-углеродные наностенки-диэлектрик-металл (MCNWIM) с толщиной  $\text{AlO}_x$  20 нм и схематическое изображение всех функциональных слоев квази 3-D конденсатора MCNWIM показано на рисунке 2.



**Рис. 2.** СЭМ изображение квази 3-D структуры MCNWIM (масштабная линейка – 500 нм) и схематическое изображение структуры квази 3-D конденсатора MCNWIM

На рисунке 3 представлена эквивалентная схема емкостного элемента на основе квази 3-D MCNWIM, которое учитывает собственное сопротивление УНС и электродов. Емкостная нагрузка представляет собой эквивалентную схему, где  $C^*$  – исследуемый объект (емкостная нагрузка),  $C$  – емкость,  $R_s$  – последовательное сопротивление,  $R_p$  – параллельное сопротивление.



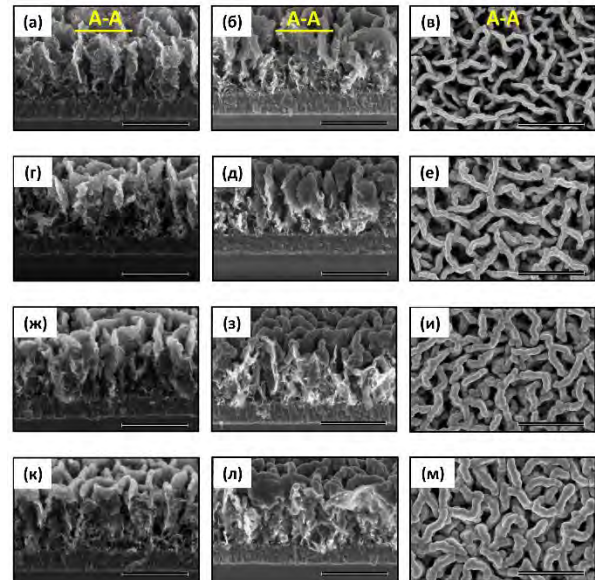
**Рис. 3.** Эквивалентная схема реального квази 3-D MCNWIM конденсатора

### Результаты и обсуждение

На рисунке 4 представлено СЭМ изображение (вид сверху и скол) УНС с осажденным оксидом алюминия методом ALD и осажденными нитридом титана методом PEALD. Толщина слоя  $\text{AlO}_x$  составляла 5 нм (рисунок 3 а-в), 10 нм (рисунок 4 г-е), 15 нм (рисунок 3 ж-и) и 20 нм (рисунок 3 к-м). На рисунке 3а можно наблюдать неконформное покрытие и центры зародышеобразования  $\text{AlO}_x$  на поверхности УНС. Изготовленные конденсаторы с такой толщиной оксида алюминия были полностью закорочены. При толщине диэлектрика 10 нм и выше можно наблюдать покрытие без физических разрывов.

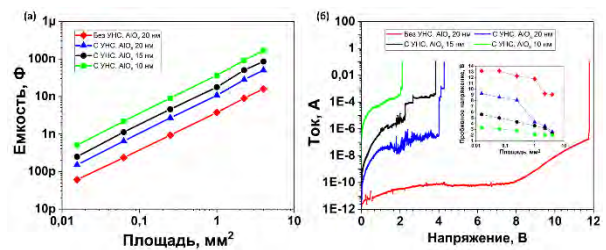
В отличии от термического ALD, у PEALD способность к конформному покрытию высокоаспектных

структур ниже [6]. На рисунках 3 (б)-(л) видно, что глубина покрытия нитридом титана толщиной 12 нм меньше, чем у  $\text{AlO}_x$  полученный методом термического ALD.



**Рис. 4.** СЭМ изображение и скол УНС с осажденным оксидом алюминия и нитридом титана толщиной 10 нм методом ALD и PEALD. (а), (б), (в)-толщина  $\text{AlO}_x$  5 нм. (г), (д), (е) - толщина слоя  $\text{AlO}_x$  10 нм. (ж), (з), (и) толщина  $\text{AlO}_x$  15 нм. (к), (л), (м) толщина  $\text{AlO}_x$  20 нм. Размер рисунка 500 нм

На рисунке 5а показаны зависимости емкости от площади квази 3-D MCNWIM конденсаторов без УНС и толщиной  $\text{AlO}_x$  20 нм и с УНС толщиной  $\text{AlO}_x$  20, 15, 10 нм. Данные зависимости являются линейными, что хорошо согласуется с моделью плоского конденсатора.



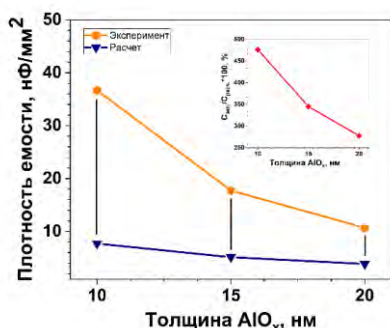
**Рис. 5.** (а) Зависимость емкости конденсаторов от площади без УНС с толщиной  $\text{AlO}_x$  20 нм и с УНС толщиной  $\text{AlO}_x$  20, 15, 10 нм. (б) ВАХ конденсаторов без УНС и толщиной  $\text{AlO}_x$  20 нм и с УНС толщиной  $\text{AlO}_x$  20, 15, 10 нм. площадью 1  $\text{mm}^2$  и зависимость пробивных напряжений от площади конденсаторов

На рисунке 5б показаны вольт-амперные характеристики и зависимость пробивного напряжения от площади квази 3-D MCNWIM конденсаторов без УНС и толщиной  $\text{AlO}_x$  20 нм и с УНС толщиной  $\text{AlO}_x$  20, 15, 10 нм с площадью 1  $\text{mm}^2$ . Самый низкий



ток утечки у конденсатора без УНС с диэлектрическим слоем  $\text{AlO}_x$  толщиной 20 нм. Он же обладает самой высокой электрической прочностью равной 5.8 МВ/см. Нано-структурирование нижнего электрода приводит к увеличению тока утечки и чем меньше толщина  $\text{AlO}_x$ , тем выше его значения. Так же уменьшается электрическая прочность для конденсаторов с УНС. Для толщины  $\text{AlO}_x$  20 нм она составляет 2.1 МВ/см,  $\text{AlO}_x$  15 нм – 1.8 МВ/см и  $\text{AlO}_x$  10 нм – 1.0 МВ/см, соответственно.

Таким образом удалось добиться существенного прироста в плотности емкости квази 3-D MCNWIM конденсаторов в сравнении с обычными планарными конденсаторами. Наши исследования показывают, что увеличение удельной емкости существенно зависит от толщины диэлектрического слоя. На рисунке 6 показана экспериментальная и теоретическая зависимость плотности емкости от толщины  $\text{AlO}_x$  на площади 1 мм<sup>2</sup>. На данном графике можно видеть, что экспериментальная кривая при толщине  $\text{AlO}_x$  более 20 нм асимптотически приближается к теоретической, напротив, при малых толщинах  $\text{AlO}_x$  расхождение становится более заметным. Для толщины  $\text{AlO}_x$  20 нм увеличение плотности емкости составило 277 %,  $\text{AlO}_x$  15 нм – 345 % и  $\text{AlO}_x$  10 нм – 476 %, соответственно.



**Рис. 6.** Теоретическая и экспериментальная зависимости удельной емкости от толщины  $\text{AlO}_x$  для конденсаторов площадью 1 мм<sup>2</sup> и зависимость отношения экспериментальной к теоретической плотности емкости от толщины  $\text{AlO}_x$

## Выводы

Интеграция углеродных наностенок в базовый электрод электростатического конденсатора позволяет

получать структуры с более высокой удельной емкостью, чем у планарных конденсаторов. Полученная структура металл/углеродные наностенки/изоляторы/металл обладает уникальными свойствами и значительными возможностями для улучшения. Достигнутый максимум плотности емкости 3.6 мкФ/см<sup>2</sup> для квази 3-D MCNWIM структуры не является пределом и может быть дополнительно увеличена за счет функционализации внешних графеновых слоев и оптимизации процесса осаждения. При этом, диэлектрическая прочность равная 1.0 МВ/см, так же может быть увеличена, использованием других типов диэлектриков или компаундов с высокими пробивными напряжениями [7].

## Литература

1. Roozeboom, F., et al. "High-density, low-loss MOS decoupling capacitors integrated in a GSM power amplifier." *MRS Online Proceedings Library* 783.1 (2003): 631-636.
2. Yu-Jian, Huang, et al. "Electrical characterization of metal-insulator-metal capacitors with atomic-layer-deposited HfO<sub>2</sub> dielectrics for radio frequency integrated circuit application." *Chinese Physics Letters* 24.10 (2007): 2942.
3. Liu, Ruichen, Chien-Shing Pai, and Emilio Martinez. "Interconnect technology trend for microelectronics." *Solid-State Electronics* 43.6 (1999): 1003-1009.
4. Clark, Robert D. "Emerging applications for high k materials in VLSI technology." *Materials* 7.4 (2014): 2913-2944.
5. Jain, Pushkar, and Eugene J. Rymaszewski. "Embedded thin film capacitors-theoretical limits." *IEEE Transactions on advanced packaging* 25.3 (2002): 454-458.
6. Assaud, Loïc, et al. "Highly-conformal TiN thin films grown by thermal and plasma-enhanced atomic layer deposition." *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 3.7 (2014): P253.
7. Mumlyakov, A. M., et al. "Dielectric properties investigation of a compound based on atomic layer deposited multi-layer structure." *Journal of Alloys and Compounds* 858 (2021): 157713.

# Электрoлюминесценция InGaAs/AlGaAs/GaAs-структур с p-областью, полученной путем диффузии цинка из металлического слоя

И.С. Набиуллин<sup>1,\*</sup>, А.Н. Клочков<sup>1</sup>, А.А. Горелов<sup>1</sup>, А.Н. Виниченко<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409.

\*ildar.s.n@yandex.ru

Существуют различные способы легирования полупроводниковых слоев вне процесса роста. Известен способ легирования примесью p-типа из различных соединений: ZnAs<sub>2</sub>, Ga/As/Zn [1], газовой фазы [2], Zn<sub>3</sub>As<sub>2</sub> [3], полимерных диффузатов [4], SiO<sub>2</sub> [5]. Данная работа призвана продемонстрировать возможность легирования полупроводниковых слоев путем вжигания металлического цинка из поверхностного слоя для получения электрoлюминесцентных приборов и исследования электрoлюминесценции структур с квантовыми ямами.

В качестве излучающей структуры была взята лазерная структура, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Ribier Compact 21-T на подложке n-GaAs (100) со степенью легирования  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Гетероструктура со стороны подложки n-GaAs имеет буферный слой GaAs 300 нм, эпитаксиально легированный кремнием до концентрации  $4,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Далее следовала переходная сверхрешетка 40 нм со слоями GaAs (8 нм)/Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As(3 нм)/GaAs(6 нм)/Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As(4 нм)/GaAs(4 нм)/Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As(5 нм)/GaAs(2 нм)/Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As(8 нм). Затем Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As-эмиттер 850 нм ( $2,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и GaAs-слой прерывания для сглаживания состава. После выращивались слои двойной гетероструктуры с отдельным ограничением и квантовой ямой In<sub>0,21</sub>Ga<sub>0,79</sub>As 6,74 нм, GaAs-барьерами 5 нм и окружающими барьерами Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As.

Толщина волноводного слоя с обкладками Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As составила 1600 нм. Квантовая яма с барьерами располагались ближе к p-эмиттеру Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As на расстоянии 250 нм, чтобы увеличить инжекцию дырок. Часть волновода (1050 нм) со стороны n-эмиттера была дополнительно легирована для улучшения инжекции. Толщина p-эмиттера Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As составила 65 нм. После p-эмиттера шел

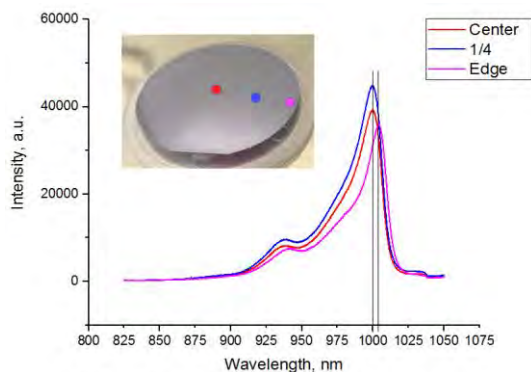
слой сверхрешетки Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As/GaAs 40 нм и контактный слой GaAs 10 нм.

Для p-легирования верхних слоев гетероструктуры использовался цинк в качестве акцепторной примеси. Слой металлического цинка 100 нм был нанесен методом вакуумного термического испарения. Затем методом плазмохимического осаждения был нанесен защитный слой SiO<sub>2</sub> для предотвращения испарения цинка с поверхности при последующем отжиге структуры. После инкапсуляции пленкой SiO<sub>2</sub> диффузия цинка проводилась методом быстрого термического отжига в трех режимах: 1) 700°C, 5 мин; 2) 650°C, 5 мин; 3) 650°C, 15 мин. Режимы диффузии цинка были выбраны, исходя из предельной температуры, при которой в наших предыдущих опытах возникало размывание квантовой ямы InGaAs. После отжига слой SiO<sub>2</sub> был удален методом плазмохимического травления. Шероховатость поверхности, определенная на профилометре, во всех режимах составила порядка 50 нм. После вжигания цинка на обе стороны пластины были нанесены контакты: на обратную сторону – p-типа Ni (5 нм) / Ge (20 нм) / Au (40 нм) / Ni (18 нм) / Au (120 нм), на верх структуры – p-типа – Ti (5 нм) / Au (25 нм) / Ti (20 нм) / Au (120 нм).

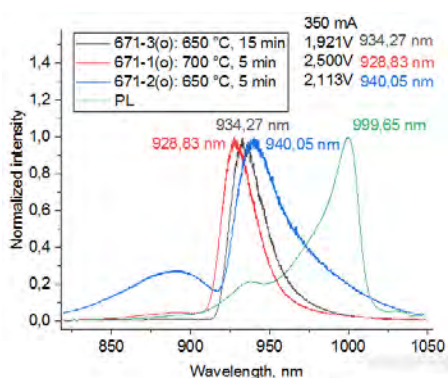
Спектры фото- и электрoлюминесценции были измерены с помощью спектрометра Horiba и кремниевого детектора CCD iHR R550. Фотовозбуждение структур производилось с помощью зеленого лазера на 532 нм. Токовая накачка производилась с помощью источника тока и микрoзонда, подводимому к образцу, размещаемому на зондовой станции. Люминесценция структур собиралась через оптическое волокно с широким коллектором. Эксперимент по фотолюминесценции проводился до нанесения и вжигания металлического слоя цинка. Структуры as-grown показали максимум излучения

на длине волны 1000 нм в центре пластины и 1004 нм – на краю (Рисунок 1).

На спектрах электролюминесценции наблюдается смещение максимума интенсивности излучения в коротковолновую область относительно фотолюминесценции (Рисунок 2). Чем больше время отжига, либо температура, тем больше наблюдается сдвиг в коротковолновую область. Дополнительно был проведен отжиг as-grown-структур без цинка, чтобы отделить фактор влияния отжига на вид спектра фотолюминесценции. Как видно из рисунка 3, отжиг не влияет на положение максимума в пределах ошибки его определения. Проведены исследования токовой зависимости спектров ЭЛ и обнаружено, что с увеличением тока и напряжения увеличивается длина волны излучения (Рисунок 4). Эффект может быть обусловлен разогревом области эмиссии.



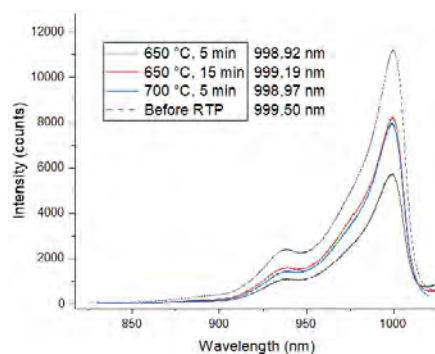
**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции гетероструктуры, полученные в разных точках пластины. На краю пластины наблюдается неоднородность



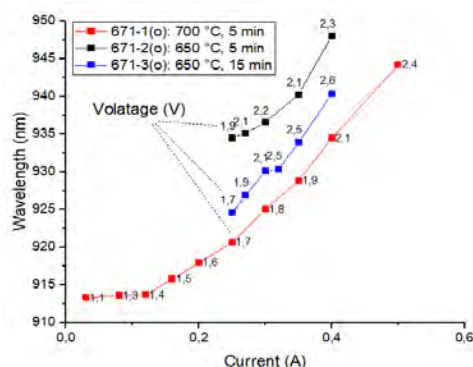
**Рис. 2.** Нормированные спектры электролюминесценции при токе 350 мА через структуру

Таким образом, продемонстрирована возможность достижения электролюминесценции гетероструктуры ближнего ИК-диапазона с р-областью, созданной путем вжигания цинка из металлического слоя при разных температурах и времени вжигания.

Смещение электролюминесценции легированных структур относительно фотолюминесценции нелегированных не могло быть вызвано нагревом структуры, поскольку оно является коротковолновым. Также нельзя связать его с размытием квантовой ямы при вжигании цинка, поскольку образцы без цинка, отожженные при тех же режимах, не показали сдвига фотолюминесценции. Изменение длины волны излучения структуры относительно фотолюминесценции предположительно связано с возбуждением второго уровня в квантовой яме или с изгибом зон при возникновении встроенного поля после легирования, его изменением при подаче смещения на структуру, а разница в смещении для разных режимов отжига – в различном влиянии глубины, степени легирования, качества прилегания контакта на характер изгиба зон.



**Рис. 3.** Спектры фотолюминесценции гетероструктуры, полученные в разных точках пластины. На краю пластины наблюдается неоднородность



**Рис. 4.** Зависимость длины волны в максимуме мощности от тока и напряжения для образцов с разными временами отжига

## Литература

1. Matsumoto Y. // Japanese Journal of Applied Physics, V. 22, № 5, pp. 829-835 (1983).
2. Андреев В.М., Сулима О.В. // Журнал технической физики, Т. 54, № 7, С. 1320–1324 (1984).



3. Kahen K.B. // MRS Online Proc. Libr, V. 163, № 1, pp. 681–684 (2011).
4. Гук Е.Г. и др. // Физика и техника полупроводников, Т. 33, № 3, С. 257–269 (1999).
5. Kalkur T.S., Lu Y.C., Paz de Araujo C.A. // MRS Online Proc. Libr. Springer, V. 92, № 1, pp. 461–468 (1987).

# Электрон-электронное рассеяние и проводимость систем с галилеевски инвариантным спектром

К.Э. Нагаев<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д. 11, Москва, 125009.

\*nag@cplire.ru

Показано, что электрон-электронные столкновения дают вклад в электросопротивление систем с параболическим спектром при условии, что поверхность Ферми многосвязна и существует дополнительный механизм рассеяния. С этой целью вычислено сопротивление двумерного электронного газа с двумя заполненными подзонами поперечного квантования при наличии электрон-электронного и примесного рассеяния. Хотя столкновения между электронами прямо не влияют на ток в таких системах, они приводят к перераспределению электронов между подзонами, и это приводит к существенному изменению сопротивления для реалистических механизмов примесного рассеяния.

## Введение

Влияние электрон-электронных столкновений на проводимость систем с галилеевски инвариантным спектром рассматривалось во многих работах [1-4]. В системах с простым параболическим спектром электрон-электронное рассеяние не даёт вклада в электросопротивление из-за их галилеевской инвариантности. Другими словами, столкновения между электронами не изменяют ток, потому что он пропорционален суммарному импульсу электронов, который при столкновениях сохраняется. Мы показываем, что электрон-электронные столкновения дают вклад в сопротивление даже для электронов с галилеевски инвариантным спектром при наличии дополнительного механизма рассеяния. Для этого рассматривается двумерный электронный газ в полупроводниковой гетероструктуре с двумя заселёнными подзонами поперечного квантования. Поверхность Ферми в такой системе состоит из двух отдельных контуров, но эффективные массы в обеих подзонах одинаковы, так что отдельные электрон-электронные столкновения не могут изменить ток. Тем не менее, эти столкновения в конечном итоге влияют на сопротивление, если либо примесное рассеяние на этих контурах имеет разную величину, либо имеется достаточно сильное примесное рассеяние между подзонами. Причина состоит в том, что межчастичные столкновения перераспределяют электроны между двумя контурами. В результате сопротивление растёт с температурой, достигая нового конечного значения. Проанализированы различные механизмы примесного рассеяния и определены оптимальные условия для наблюдения этих эффектов.

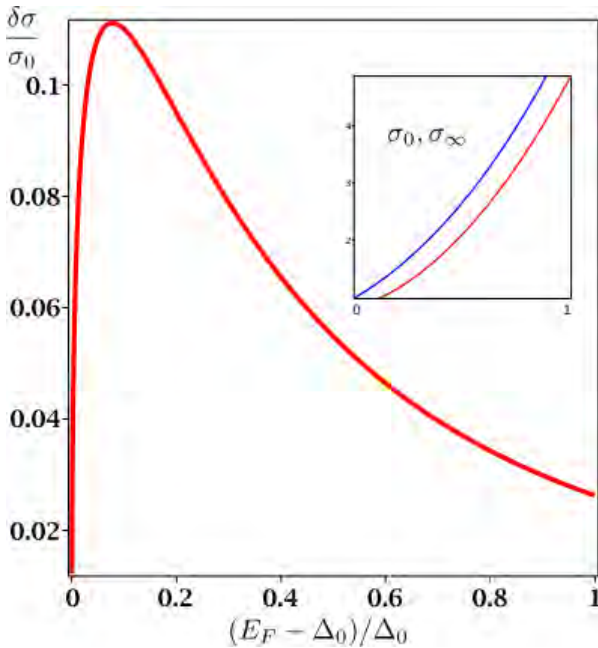
## Метод расчета

Для вычисления электропроводности использовалось кинетическое уравнение Больцмана с электрон-электронным и электрон-примесным интегралом столкновения. Эти интегралы выводились микроскопически с учётом переходов между подзонами. Также предполагалось, что вблизи электронного газа находится электростатический затвор, который экранирует кулоновское взаимодействие. Поскольку интеграл электрон-электронных столкновений нелокален по энергии, уравнение Больцмана свелось к системе двух интегральных уравнений для функций распределения электронов на двух фермиевских контурах. Эти уравнения были приведены к дифференциальному виду с помощью преобразования Фурье и затем сведены к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений путём разложения по собственным функциям дифференциального оператора.

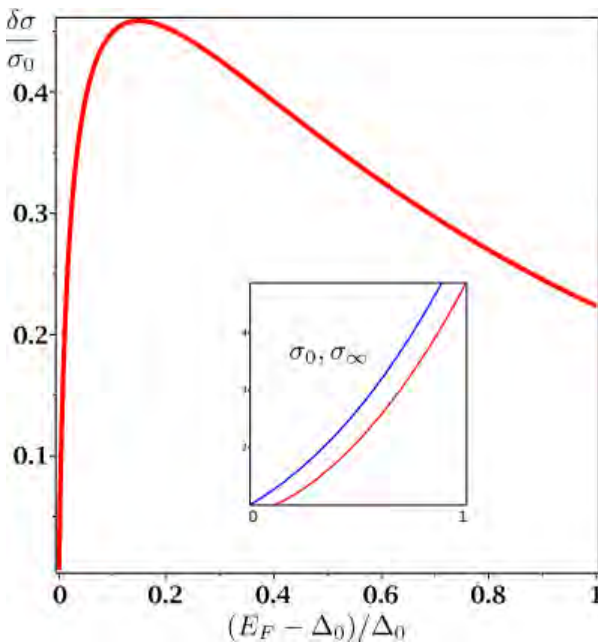
В пределе сильного электрон-электронного взаимодействия  $\Gamma_{ee} \gg \Gamma_{imp}$  эту систему можно свести к всего двум уравнениям и найти наиболее сингулярную часть проводимости, которая определяется примесным рассеянием. При произвольном соотношении между интенсивностями этих типов рассеяния система решалась численно.

## Результаты и обсуждение

Электрон-электронное рассеяние приводит к подавлению проводимости с ростом температуры. Она



**Рис. 1.** Зависимость относительного изменения проводимости  $\delta\sigma/\sigma(0)$  от положения уровня Ферми  $E_F$  для равномерно распределённых в объёме кулоновских примесей. На вставке показаны  $\sigma(0)$  (синяя кривая) и  $\sigma(\infty)$  (красная кривая) в зависимости от  $E_F$



**Рис. 3.** Зависимость относительного изменения проводимости  $\delta\sigma/\sigma(0)$  от положения уровня Ферми  $E_F$  для дельта-легированных кулоновских примесей. Расстояние между электронным газом и слоем примесей равно  $h_0 = 3 \hbar/p_F^{(1)}(\Delta_0)$ . На вставке показаны  $\sigma(0)$  (синяя кривая) и  $\sigma(\infty)$  (красная кривая) в зависимости от  $E_F$

уменьшается до конечного значения, которое определяется отношением интенсивности примесного рассеяния в двух разных подзонах  $\Gamma_{imp}^{(1)}/\Gamma_{imp}^{(2)}$ . Ве-

личина изменения проводимости с ростом температуры  $\delta\sigma = \sigma(0) - \sigma(\infty)$  пропорциональна  $(\Gamma_{imp}^{(1)} - \Gamma_{imp}^{(2)})^2$  и всегда положительна. Чтобы оценить  $\delta\sigma$ , рассматривалось рассеяние на разных типах примесей. Для нейтральных точечных примесей и треугольной потенциальной ямы получается отношение  $\Gamma_{imp}^{(1)}/\Gamma_{imp}^{(2)} \approx 1.3$ , что приводит к подавлению проводимости порядка 1%.

В случае равномерно распределённых в объёме кулоновских примесей отношение  $\Gamma_{imp}^{(1)}/\Gamma_{imp}^{(2)}$  равно обратному отношению фермиевских импульсов  $p_F^{(2)}/p_F^{(1)}$  на соответствующих контурах. Расчёты показывают, что в этом случае максимальное относительное изменение проводимости  $\delta\sigma/\sigma(0)$  порядка 10% достигается при  $E_F \approx 1.1 \Delta_0$ , где  $\Delta_0$  - расщепление между подзонами, т. е. когда верхняя подзона ещё только начинает заполняться (рисунок 1).

Подавление проводимости с температурой оказывается наибольшим, если кулоновские примеси случайно распределены в  $\delta$ -слое на расстоянии  $h_0$  от плоскости электронного газа. Если  $p_F^{(n)}h_0 \gg \hbar$ , то  $\Gamma_{imp}^{(n)}$  пропорционально  $(p_F h_0/\hbar)^{-3}$ . Таким образом, при  $p_F^{(1)}h_0 > \hbar$  и  $p_F^{(2)}h_0 < \hbar$  возможно добиться соотношения  $\Gamma_{imp}^{(1)} \ll \Gamma_{imp}^{(2)}$ , и тогда подавление проводимости может быть порядка 100% (рисунок 2).

Поскольку выражения для  $\sigma(0)$  и  $\sigma(\infty)$  не содержат параметров электрон-электронного рассеяния, они позволяют отдельно определить скорости рассеяния электронов  $\Gamma_{imp}^{(1)}$  и  $\Gamma_{imp}^{(2)}$  в каждой из подзон.

Хотя численные результаты были получены для частного случая случая кулоновского взаимодействия, экранированного металлическим затвором, сделанные здесь общие выводы справедливы для произвольного вида взаимодействия, поскольку они основываются только на статистике Ферми и законах сохранения.

### Литература

1. W. G. Baber // Proceedings of Royal Society London, V. 158, 383 (1937).
2. C. A. Kukkonen and P. F. Maldague // Physical Review Letters, V. 37, 782 (1976).
3. D. L. Maslov, V. I. Yudson, and A. V. Chubukov // Physical Review Letters, V. 106, 106403 (2011).
4. K. E. Nagaev and A. A. Manoshin // Physical Review B, V. 102, 155411 (2020).

# Моделирование отжига нанопроволок GaAs

А.Г. Настовьяк<sup>1, 2, \*</sup>, Д.В. Штеренталь<sup>2</sup>, И.Г. Неизвестный<sup>1, 2</sup>, Н.Л. Шварц<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, ул. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Технический Университет, пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073.

\*alla@isp.nsc.ru

С помощью моделирования методом Монте-Карло рассмотрен процесс отжига вертикальных нанопроволок GaAs в условиях неконгруэнтного испарения. Исследована кинетика возникновения капель Ga на боковых стенках и распределение капель вдоль длины нанопроволок.

## Введение

Для наблюдения квантово-размерных эффектов в полупроводниковых нанопроволоках (НП) их диаметр должен быть мал. Недавно для уменьшения диаметра вертикальных НП GaAs, полученных методом пар-жидкость-кристалл (ПЖК), был предложен их послеростовой отжиг [1]. Это позволило получить НП со средним диаметром порядка 10 нм. Недостатком этой методики оказалась неоднородность диаметра нанопроволоки вдоль ее оси. Авторы работы [1] объясняют это разной скоростью испарения верхней грани НП и ее боковых стенок. В настоящей работе мы предлагаем альтернативное объяснение наблюдаемого эффекта.

## Монте-Карло модель

Исследование отжига НП GaAs осуществлялось с помощью моделирования методом Монте-Карло [2]. Исходная модельная система представляла собой вертикально ориентированный кристалл GaAs цилиндрической формы, расположенный в центре подложки GaAs размером  $35 \times 41$  нм, покрытой пленкой SiO<sub>2</sub>. Циклические граничные условия в латеральных направлениях делают рассматриваемую систему эквивалентной бесконечному массиву плотно расположенных вертикальных НП. Моделировались отжики НП различной длины – в диапазоне от 31 до 471 нм.

## Результаты и обсуждение

Отжиг проводился при температурах 840 и 890 К. В процессе отжига на боковой поверхности появлялись капли галлия. Были получены зависимости количества капель  $N_{\text{drop}}$  от длины НП  $L$ . Видно, что число капель сначала линейно возрастает с длиной НП, но, начиная с некоторой длины, выходит на насыщение (Рис. 1(1)). На боковых стенках длинных НП капли Ga располагались вдоль оси про-

локи неравномерно. Известно, что при ПЖК росте плотного массива вертикальных НП существенную роль начинает играть реадсорбция материала [3]. Мы предположили, что реадсорбция может существенно влиять и на отжиг НП, препятствуя разрушению боковой стенки НП и соответственно образованию капель галлия. Был промоделирован отжиг в отсутствие реадсорбции, когда материал, испаряемый с боковых стенок НП, удалялся из системы без возможности переотражения. В этих условиях количество капель, линейно возрастало с длиной кристалла (Рис. 1(2)) и капли были равномерно распределены по боковой поверхности НП.

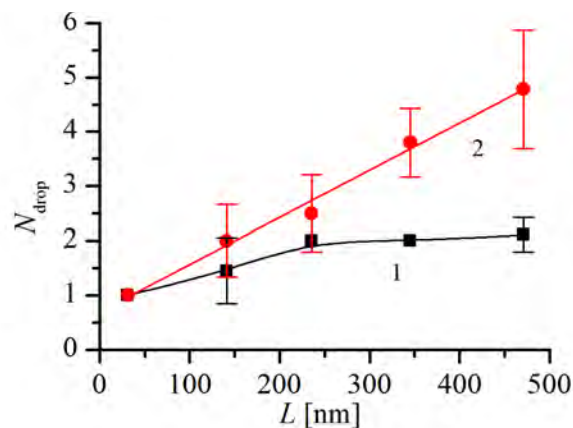


Рис. 1. Зависимости числа капель, образующихся при отжиге НП, от их длины в условиях: наличия реадсорбции (1); без реадсорбции (2). Температура отжига  $T = 840$  К

На Рис. 2 представлены гистограммы, характеризующие вероятность расположения капель  $P$  вдоль оси НП  $z$ . Видно, что, начиная с некоторой длины, на боковой поверхности появляется область, свободная от капель. Анализ кинетики появления капель показал, что первыми возникают капли у вершины НП, следом за ними формируются капли у основания и лишь затем на боковой поверхности. Эта последовательность нарушается только в случае очень коротких НП.

Для объяснения этих результатов мы предложили схему процесса испарения с учетом реадсорбции. Для длинных плотно расположенных НП испарение вещества с удалением его из системы происходит только в верхней части НП на расстоянии, которое могут преодолеть молекулы мышьяка за счет переотражения между соседними НП до выхода в вакуум. Поэтому в верхней части НП образуется избыток галлия, из которого формируются капли. В нижней части НП протекают два противоположно направленных процесса — разрушение и восстановление боковой стенки НП за счет встраивания переотражаемого материала. Таким образом, испарение нижней части кристалла близко к квазиравновесному процессу, а верхней части к свободному испарению в вакуум. Из этих соображений также легко объяснить кинетику появления капель. Избыток галлия в первую очередь возникает на вершине кристалла, так как она находится в условиях свободного испарения в вакуум. На следующем этапе

избыток галлия накапливается у основания НП. Это связано с реадсорбцией галлия с боковых стенок кристалла на подложку, который затем за счет диффузии достигает основания НП. В последнюю очередь капли формируются на боковых стенках кристалла. Их появление связано с постепенным накоплением избыточного галлия из-за выхода в вакуум мышьяка с боковых стенок за счет переотражения между соседними НП. Капли у вершины нанопроволок отсутствуют только в том случае, если они настолько коротки, что со всей их боковой поверхности возможно свободное испарение материала (Рис. 2(1)). В этом случае избыточный галлий собирается в капли в энергетически выгодном месте — у основания НП.

Предлагаемая схема процесса отжига с учетом реадсорбции позволяет качественно объяснить результат, полученный ранее в работе [1] — за счет реадсорбции скорость испарения кристалла в нижней его части оказывается меньше, чем в верхней.

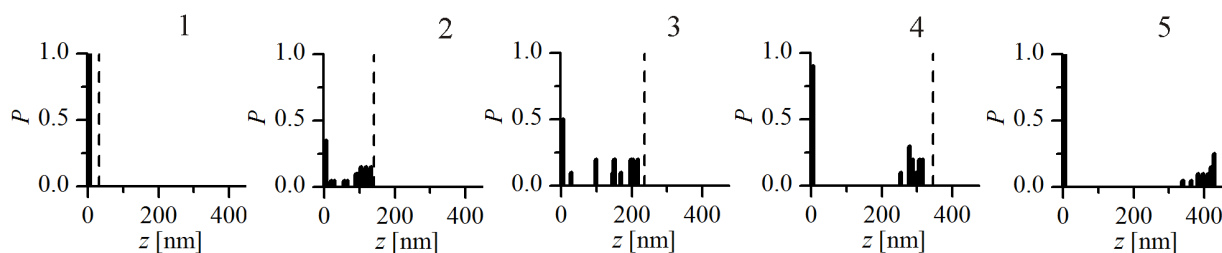


Рис. 2. Распределение капель вдоль длины НП. Длина НП: (1) 31 нм; (2) 141 нм; (3) 235 нм; (4) 345 нм; (5) 471 нм. Длина НП показана пунктирной линией.  $T = 840$  К

## Благодарности

Работа подготовлена при поддержке программы Минобрнауки РФ (№ 0242-2021-0008).

## Литература

1. I. Ilkiv *et al.* // *Nanotechnology*, V. 31, 055701 (2019).
2. А.Н. Карпов и др. // *Выч. методы и программирование: новые вычислительные технологии*, № 15, 388 (2014).
3. M.R. Ramdani *et al.* // *J. Cryst. Growth Des.*, V. 13, 91 (2013).

# Оптические и фотоэлектрические свойства пленок $ZnSnN_2$ полученных методом магнетронного распыления

А.В. Нежданов<sup>1,\*</sup>, А.А. Скрылев<sup>1</sup>, А.С. Маркелов<sup>1</sup>, А.И. Машин<sup>1</sup>, Д.В. Шестаков<sup>1</sup>,  
А.О. Жуков<sup>1</sup>, Д.А. Усанов<sup>2</sup>, G.De Filpo<sup>3</sup>

1 Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

2 Paul Scherrer Institut, Forschungsstrasse 111, Villigen CH-5232, Switzerland.

3 University of Calabria, 87036 Rende (CS), Italy.

\*nezhdanov@phys.unn.ru

Работа посвящена исследованию плёнок  $ZnSnN_2$  с различным составом, полученные методом импульсного магнетронного распыления. Методами рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния исследована структура полученных плёнок. Исследованы оптические и фотоэлектрические свойства, определена оптическая ширина запрещенной зоны и подвижность носителей заряда. Обнаружено наличие фотолюминесценции в области 550–750 нм с максимумом на длине волны 630 нм.

## Введение

В последнее время нитриды произвели революцию в оптической и силовой электронике, что прогнозировалось ещё в 90-х годах прошлого века [1-3]. Включение тройных нитридов  $Zn-IV-N_2$  в семейство нитридных полупроводников предлагает новые перспективы для проектирования интеллектуальных материалов и устройств. Преимущества  $ZnSnN_2$ (ZTN) по сравнению с другими полупроводниками, в частности используемыми в солнечных элементах: (а) состоит из элементов, распространенных на Земле, то есть  $ZnSnN_2$  экономичны по сравнению с III-N; (б) более низкими температурами осаждения по сравнению с III-N, и (в) регулируемый диапазон поглощения хорошо согласующийся со спектром солнечного света. Важно отметить, что  $ZnSnN_2$  потенциально может продемонстрировать достаточно высокую подвижность носителей ( $\sim 22 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )[4], а также имеет регулируемую, за счёт изменения состава, ширину запрещенной зоны (1.0–2.4 эВ)[4]. Благодаря этим благоприятным свойствам  $ZnSnN_2$  имеет огромный потенциал для применения в солнечной энергетике, оптоэлектронике, фотокатализе и т. д.

Кроме того, система  $ZnSnN_2$  является относительно неизученным представителем семейства полупроводников  $Zn-IV-N_2$  (первый экспериментальный отчет по получению эпитаксиальных слоёв  $ZnSnN_2$  появился в 2013 г.[5]) и количество данных о ней мало и иногда противоречиво, например, оптическая ширина запрещенной зоны еще не определена однозначно.

## Методика эксперимента

Для получения плёнок применялась методика импульсного магнетронного распыления. Распыление мишеней, металлические Zn (99,995%) и Sn (99,995%), происходило в смеси газов Ar и  $N_2$ . Базовое давление перед выращиванием было ниже  $2 \times 10^{-8}$  мбар, а давление при осаждении поддерживалось на уровне  $2 \times 10^{-3}$  мбар. Изменение состава достигалось путём изменения мощности, подаваемой на источники веществ. В качестве подложек использовались кристаллический кремний и сапфир различной ориентации, а также плавленный кварц. Температура подложек поддерживалась постоянной  $\sim 400$  °C.

Исследование состава образцов проводилось с помощью рентгеновского микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JSM IT-300LV (JEOL) с энергодисперсионным детектором MaxN 20 (Oxford Instruments). Исследования структуры осуществлялось методом дифракции рентгеновских лучей (XRD) на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в режиме фиксированного времени в диапазоне  $10 - 80 2\theta$  с шагом  $0.02 2\theta$ , используя излучение  $CuK\alpha$  с длиной волны 1.5406 нм. Спектры комбинационного рассеяния (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) были получены с помощью системы NTEGRA Spectra (NT-MDT, Зеленоград) при комнатной температуре. Спектры КРС были получены в схеме на отражение в диапазоне  $50-900 \text{ cm}^{-1}$  с использованием лазера, работающего на длине волны 473 нм. Спектры ФЛ в диапазоне 480-800нм, возбуждение



473 нм. Оптическое пропускание и отражение было получено на двухлучевом спектрофотометре Cary 5000 (Varian) в диапазоне длин волн 200-3000 нм. Морфология поверхности образцов исследована с использованием атомно силовой сканирующей головки Spena, на базе системы NTEGRA Spectra компании NT-MDT (г. Зеленоград, Россия).

## Результаты

Изменение состава плёнок в сторону увеличения содержания Sn от 50/50, приводит к увеличению шероховатости поверхности от 0.6 до 1.4 нм (Рисунок 1).

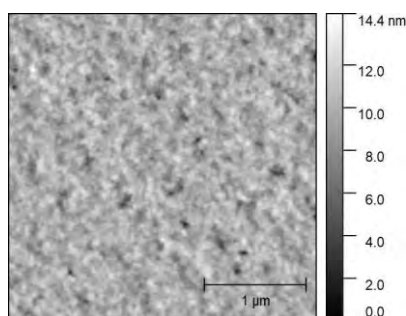


Рис. 1. Атомно-силовая микроскопия поверхности плёнки ZTN (Zn/Sn=46/54)

Спектроскопия КРС демонстрирует широкие пики (Рисунок 2).

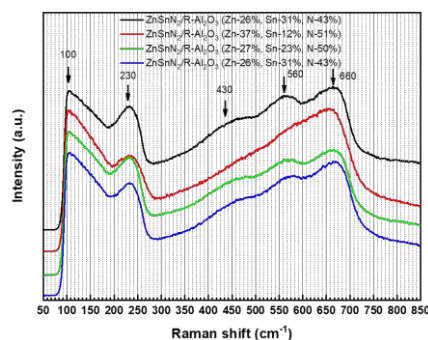


Рис. 2. КРС плёнок ZnSnN<sub>2</sub> в зависимости от состава

Спектры имеют схожий характер, однако отличаются друг от друга. Они имеют пик на частоте 100 см<sup>-1</sup>, линию на частотах 200~250 см<sup>-1</sup> с особенностью на 235 см<sup>-1</sup>, а также широкую полосу 300~700 см<sup>-1</sup> с

пиками на 560 см<sup>-1</sup>, 660 см<sup>-1</sup>, 430 см<sup>-1</sup>. Особенности на спектре ZnSnN<sub>2</sub> с наибольшим соотношением Zn:Sn имеют неявный характер, что может быть связано с наибольшей неупорядоченностью атомов в кристаллической решетке.

Результаты XRD представлены на рисунке 3.

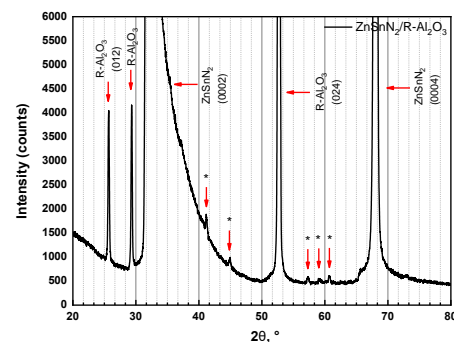


Рис. 3. XRD плёнки ZTN (Zn/Sn=46/54)

На рентгенограмме можно наблюдать серию пиков относящихся к подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R - срез), так и пики, согласно литературным данным [5], соответствующие ZnSnN<sub>2</sub> (0002) и ZnSnN<sub>2</sub> (0004).

Спектроскопия ФЛ показала наличие широкого пика в области 550-750 нм с максимумом на 630 нм, положение которого согласуется с краем оптического поглощения полученных плёнок.

В докладе обсуждаются фотоэлектрические свойства полученных плёнок.

## Литература

1. B. Gil, Group III nitride semiconductors compounds: physics and applications, Clarendon Press, (1998).
2. D. Gogova, A. Kasic, H. Larsson *et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 43 (4A) 1264-1268 (2004).
3. D. Gogova, H. Larsson, R. Yakimova *et al.* // Phys. Status Solidi (a) 200 (1) 13-17 (2003).
4. Imran S. Khan, Karen N. *et al.* // J. Phys. Energy 2 032007 1-14 (2020).
5. L. Lahourcade, N.C. Coronel, K.T. Delaney // Adv. Mater. 25 2562-2566 (2013).

# Особенности генерации волноводных мод в многоямных гетеролазерах

С.М. Некоркин<sup>1,\*</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1,§</sup>, А.В. Самарцев<sup>1</sup>, К.С. Жидяев<sup>1</sup>, А.Б. Чигинева<sup>1</sup>, А.Н. Орлова<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, А.А. Афоненко<sup>2</sup>, Д.В. Ушаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23/3. Нижний Новгород, 603950, Россия.

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, просп. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

\*nekorkin@nifti.unn.ru §bnv@nifti.unn.ru

В работе приводятся результаты сравнительного анализа двух конструкций гетеролазеров, содержащих в волноводном слое десять InGaAs/GaAs квантовых ям сдвинутых к р-эмиттеру. В зависимости от конструктивных особенностей лазеров генерация излучения может осуществляться как на поперечных модах 2-4 порядка, так и на модах с признаками их локализации в окрестности квантовых ям, что в свою очередь приводит к существенному изменению электрофизических характеристик гетеролазеров.

В последнее время возрастает интерес к гетеролазерам с увеличенной активной областью на основе квантовых ям (КЯ) [1, 2]. Настоящая работа посвящена исследованию спектральных, пространственных и энергетических характеристик двух конструкций гетеролазеров, содержащих в волноводном слое десять InGaAs/GaAs квантовых ям, сдвинутых к р-эмиттеру.

## Исследуемые образцы и методы исследования

Методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на подложке  $n^+$ -GaAs были выращены две лазерные гетероструктуры с активными областями, состоящими из десяти InGaAs/GaAs квантовых ям с компенсирующими слоями GaAsP (структура 1 и структура 2). Квантовые ямы были сдвинуты к р-эмиттеру. Общая толщина GaAs-волновода с КЯ и толщины  $n^+$ -AlGaAs ( $p^+$ -AlGaAs) ограничительных слоев составляли 4,3 и по 0,55 мкм соответственно. Волноводные слои не легировались и имели величину фоновой концентрации носителей  $n$ -типа порядка  $1,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для снижения заселенности волноводных слоев и уменьшения поглощения носителями в волноводе структуры 2 перед квантовыми ямами на расстоянии 100 нм со стороны  $n$ -эмиттера был встроен тонкий слой (15 нм)  $n$ -InGaP с концентрацией носителей  $1,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , решёточно-согласованный с GaAs. Содержание фосфора в компенсирующем слое GaAsP в структуре 2 составляло 5–6%, что в 2 раза меньше, чем в подобном слое структуры 1, а доля индия в КЯ структуры 2 на 2–3 % больше, чем в КЯ структуры 1. На выращенных структурах формировалась меза-полосковая геометрия актив-

ной области путем химического травления эпитаксиальных слоёв до волновода с последующей ионной имплантацией вытравленной области. Ширина активных полосок составляла 170 мкм, расстояние между полосками - 30 мкм. На основе полученных гетероструктур были изготовлены лазерные диоды с длиной резонатора 2 мм и двумя мезаполосковыми контактами с общей шириной активной области на излучающей грани 340 мкм (170 + 170 мкм). На излучающие грани диэлектрические зеркала не наносились.

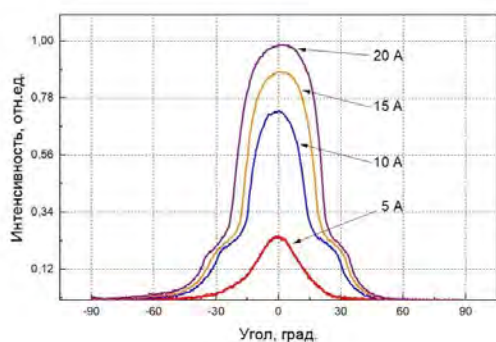
Лазерные структуры исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Проведены исследования спектральных зависимостей, диаграмм направленности и ватт-амперных характеристик (ВтАХ) изготовленных лазеров. Для наблюдения и фотографирования излучающей грани лазерных диодов использовалась ССД камера, встроенная в оптический микроскоп МИИ-4. Для устранения засветки камеры использовались спектральные фильтры. Токовая накачка лазеров осуществлялась в импульсно-периодическом режиме (200 нс; 1,43 кГц).

## Результаты и обсуждение

Метод ПЭМ подтвердил заданную геометрию эпитаксиальных слоев на обеих структурах. Дефекты и дислокации при этом не наблюдались.

Из-за различия содержания индия в КЯ в выращенных структурах максимумы генерации лазерных диодов имели разные значения: для структуры 1 типичный максимум генерации соответствовал 1,01 мкм, а для структуры 2 – 1,05 мкм.

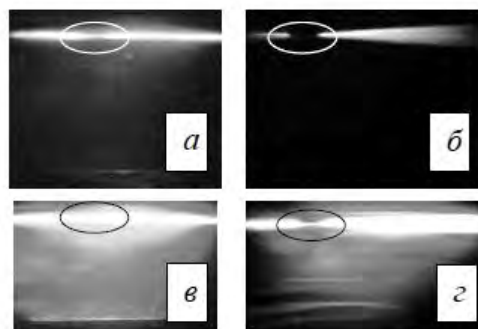
Угловые зависимости интенсивности излучения в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу лазерных диодов структуры 1 после начала стимулированной генерации лазеров, имели двухлепестковый вид (с провалом в нулевой компоненте), соответствующий моде второго порядка. Подобная диаграмма направленности наблюдалась в многоямном лазере схожей конструкции с InGaP слоем, предназначенным для снижения заселенности волноводных слоёв [1]. При увеличении тока накачки ширина диаграммы на полувывоте имеет тенденцию к уширению за счет генерации мод более высокого порядка. Диаграммы направленности лазерных диодов структуры 2 кардинально отличаются от лазерных диодов структуры 1 (рис. 1). Характерные интенсивности излучения имеют ярко выраженную нулевую компоненту, а при увеличении токовой накачки формируется симметричный «пьедестал», образованный двумя максимумами с углами  $\pm 30^\circ$ .



**Рис. 1.** Характерные интенсивности излучения лазерного диода структуры 2 от угла при разных токах накачки

Место локализации волноводных мод изготовленных лазеров было исследовано с помощью оптического микроскопа со встроенной ССД камерой (рис. 2). В качестве индикатора места локализации волноводных мод использовалась вытравленная вдоль резонатора со стороны р-эмиттера тридцатимикронная канавка, проникающая в волноводные слои, но не доходящая до излучающих слоев. Уверенная засветка частично вытравленных волноводных слоев наблюдалась на грани лазерных диодов в структуре 1 вследствие распространения излучающих мод в волноводных слоях как в допороговом, так и в послепороговом режимах токовой накачки. В структуре 2 в допороговом режиме накачки засветка вытравленной области не наблюдалась, а в послепороговом режиме засветка наблюдалась с интенсивностью, позволяющей наблюдать вытравленную область во всем диапазоне токовой накачки. Эксперимент позволил предположить, что вол-

новодные моды в структуре 2 локализованы в районе квантовых ям.



**Рис. 2.** Микрофотографии излучающей грани лазерных диодов, сделанные в допороговом и послепороговом режимах накачки а, б и в, г соответственно: а и в – структура 1, б и г – структура 2. Овалом отмечены вытравленные области между активными полосками

Анализ ВТАХ показал значительное различие рабочих характеристик исследуемых лазеров, как в отношении достижения мощности излучения, так и в отношении порогового тока. Пороговый ток структуры 1 соответствовал 15 А, а лазерных диодов структуры 2 – 5 А. При этом максимально достижимая мощность излучения для структуры 1 составляла 9,5 Вт, а для структуры 2 – не более 6,5 Вт. Такое поведение ВТАХ наряду с результатом эксперимента по определению места излучения волноводных мод могут свидетельствовать в пользу их локализации в окрестностях квантовых ям в структуре 2. В этом случае возникает большой параметр оптического ограничения и, как следствие, меньший пороговый ток. Локализация моды вблизи р-эмиттера ведёт к большим внутренним потерям на поглощение свободными носителями, что в свою очередь не позволяет получить значительную выходную мощность. Симметричная диаграмма направленности может свидетельствовать о проявлении волноводного эффекта квантовых ям. Этому способствует уменьшенное количество фосфора в компенсирующем слое, увеличение концентрации индия в квантовых ямах в структуре 2, а также пониженная концентрация носителей заряда в волноводе.

## Литература

1. Некоркин С.М. и др. // XXIV Междунар. симп. «Нанофизика и наноэлектроника», Т.2, 679 (2020).
2. Некоркин С.М. и др. // XXV Междунар. симп. «Нанофизика и наноэлектроника», Т.2, 780 (2021).

# Разработка и исследование эпитаксиальных структур InP на GaAs подложках

С.М. Некоркин<sup>1</sup>, Б.Н. Звонков<sup>1</sup>, К.С. Жидяев<sup>1</sup>, И.В. Самарцев<sup>1</sup>, А.Б. Чигинева<sup>1</sup>,  
Ю.И. Чеченин<sup>2</sup>, А.М. Щитов<sup>3</sup>, А.А. Чиликов<sup>3</sup>, С.В. Панков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> АО «НПП «Салют», ул. Ларина, д. 7, г. Н. Новгород, 603107.

<sup>3</sup> АО «НПФ «Техноякс», ул. Кашенко, д. 6, г. Н. Новгород, 603152.

\*waterbox@mail.ru

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs получены пленки InP приборного кристаллического качества. На основе полученных образцов изготовлены низкобарьерные смесительные диодные микросборки и тройной балансный смеситель (ТБС), имеющий диапазон частот входного сигнала и гетеродина 2-40 ГГц и диапазон промежуточных частот 0,5-20 ГГц. Показано, что низкобарьерные диодные микросборки на InP/GaAs структурах позволили в 20 раз снизить мощность сигнала гетеродина без ухудшения потерь преобразования во всем диапазоне частот смесителя.

Материалы на основе фосфида индия активно изучались в течение последнего десятилетия в связи с их преимуществами в длинноволновых приборах фотоники (1,3-1,6 мкм) [1]. Однако подложки InP являются дорогостоящими и хуже поддаются просторовой технологии по сравнению с GaAs. Перспективным направлением является создание искусственных подложек InP/GaAs. Основной проблемой таких подложек является дефектность верхнего эпитаксиального слоя InP [2]. Одним из наиболее перспективных вариантов уменьшения количества дефектов является использование метаморфных буферов [1,3]. В данной работе с помощью метаморфных буферов были изготовлены смесительные СВЧ диоды на основе гетероэпитаксиальных структур InP/GaAs. Исследованы электрофизические характеристики, возможность применения структур в разработках широкополосных диодных МИС смесителей, выполненных на новой элементной базе – монолитных интегральных диодных микросборках на восьми смесительных диодах.

## Экспериментальные образцы

Эпитаксиальные структуры InP/GaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках i-GaAs. Сначала выращивался гомоэпитаксиальный слой  $n^+$ -GaAs толщиной 200 нм, далее  $In_{0,51}Ga_{0,49}P$  – 200 нм.

В данной работе исследовались два варианта переходных буферов. Первый вариант - структура "А" - представлял из себя буфер  $In_{1-x}Ga_xP$  со ступенчатым изменением состава  $x$  от 0,45 (первый слой) до

0,05 (8-й слой). Общая толщина ступенчатого буфера составила 600 нм.

Второй вариант – структура "В" – представлял из себя дискретный буфер, в котором чередовались слои, согласованные по параметру решетки с подложкой и с конечным приборным слоем. В нашем случае была использована пара слоев  $In_{0,51}Ga_{0,49}P$  - InP. Сущность дискретного буфера заключается в изменении толщины слоев в паре в противоположном направлении. Первая пара представляла из себя 3 нм InP и 57 нм InGaP, а в последующих толщина InP увеличивалась, а толщина InGaP уменьшалась на 3 нм. Таким образом последней парой были слои 57 нм InP и 3 нм InGaP. Всего было выращено 19 пар слоев общей толщиной 1140 нм. После буферного слоя выращивался контактный слой  $n^+$ -InP толщиной 1,2 мкм. Легирование всех буферов, а также контактного слоя, поддерживалось на уровне  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Последним выращивался рабочий слой  $n$ -InP толщиной 150 нм, легированный до  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Контрольной структурой "С" в исследовании является гомоэпитаксиальная структура на проводящей подложке InP с теми же параметрами рабочего слоя.

При изготовлении низкобарьерных одиночных смесительных диодов и диодных микросборок на структурах "А" и "В" использована обычная технология изготовления GaAs монолитных схем. Одиночные диоды изготавливались с балочными выводами, выполненными из гальванического золота толщиной ~ 6 мкм. Диодные сборки имеют четыре независимых вывода через сквозные отверстия в GaAs с лицевой на обратную сторону кристалла.

При изготовлении диодов на проводящей структуре "С" изоляция анодного вывода осуществлялась с помощью диэлектрического слоя двуокиси кремния.

## Результаты

На структурах "А", "В", "С" были изготовлены одиночные смесительные диоды с балочными выводами. Основные параметры диодов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Электрофизические характеристики диодов

№	$R_s$ , Ом	$n$	$\phi_b$ , эВ	$C$ , пФ	$U_{обр}$ , В
А	7,0-	1,14-	0,28-	0,025-	4,0-5,0
	10,0	1,19	0,30	0,030	
В	17,0-	1,18-	0,29-	0,022-	4,0-5,0
	22,0	1,22	0,31	0,026	
С	5,5-6,5	1,16-1,20	0,26-0,28	0,025-0,030	4,0-5,0

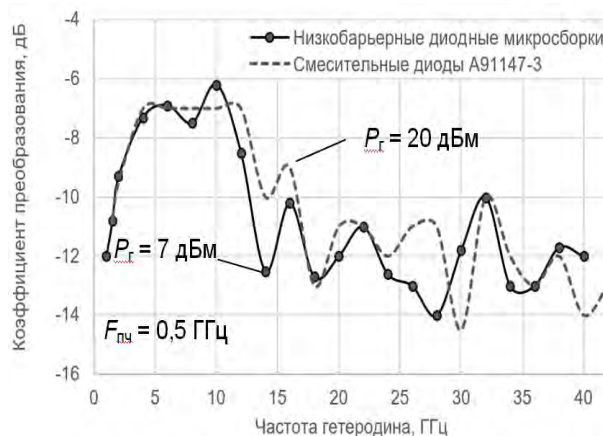
Здесь  $R_s$  - последовательное сопротивление диода,  $n$  - коэффициент неидеальности ВАХ диода,  $\phi_b$  - высота потенциального барьера,  $C$  - общая емкость диода,  $U_{обр}$  - обратное напряжение пробоя.

Использование обоих ("А" и "В") типов структур при изготовлении монокристаллических интегральных диодных микросборок на восьми смесительных диодах позволило получить рабочий уровень мощности на гетеродинном входе широкополосного смесителя не более 10 дБм и 15 дБм для диапазонов длин волн 12 мм и 7,5 мм соответственно.

На диодных микросборках типа "А" изготовлен тройной балансный смеситель (ТБС), имеющий диапазон частот входного сигнала и гетеродина 2-40 ГГц и диапазон промежуточных частот 0,5-20 ГГц.

Схема смесителя включает в себя два диодных моста, которые требуют восьми смесительных диодов. В связи с большим количеством диодов в схеме ТБС по сравнению с другими схемами смесителей требуется более высокая мощность сигнала гетеро-

дина для преодоления потенциального барьера диодов и нормального функционирования смесителя. Данная проблема решена установкой микросборок с пониженным потенциальным барьером, что позволило снизить требования к мощности сигнала



гетеродина.

Результаты экспериментального исследования тройных балансных смесителей (ТБС) на смесительных диодах А91147-3 с высотой барьера около 0,75 В, и на микросборках с пониженным потенциальным барьером приведены на рис. 1.

Рис. 1. Результаты измерения характеристик ТБС диапазона 2-40 ГГц

Использование низкобарьерных диодных микросборок позволило в 20 раз (со 100 мВт до 5 мВт) снизить мощность сигнала гетеродина, при этом, как видно из рисунка 1, ухудшения потерь преобразования во всем диапазоне частот смесителя не наблюдается. Это имеет высокую практическую ценность при проектировании тройных и двойных балансных смесителей с большим количеством диодов.

## Литература

1. Y. Sun, et. al, Sci. Mater. Electron. 28, 745 (2017).
2. Y. Okuno and T. Kawano, J. Cryst. Growth 145, 338 (1994).
3. Y. He, et. al, J. of Mat. Sci.: Materials in Electronics. 30, 7203–7208 (2019).



# Синхронизация скольжения волн зарядовой плотности механическими колебаниями

М.В. Никитин<sup>1,\*</sup>, В.Я. Покровский<sup>1</sup>, С.Г. Зыбцев<sup>1</sup>, В.В. Колесов<sup>1</sup>,  
В.В. Кашин<sup>1</sup>, Б.А. Логинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11-7, г. Москва, 125009.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет МИЭТ, площадь Шокина 1, г. Москва, г. Зеленоград, 124498.

\*nikitin@cplire.ru

Изучена проводимость нитевидных образцов квазиодномерных проводников с волной зарядовой плотности (ВЗП) в зависимости от электрического поля и частоты механической деформации образца. Обнаружено, что при совпадении частоты актюаторов, создающих деформацию, с одним из механических резонансов образца на ВАХ наблюдается подавление порогового поля и особенности в виде ступенек Шапиро. Результат открывает новую область электромеханических эффектов в квазиодномерных проводниках с ВЗП и может быть применён для детектирования и преобразования механических колебаний СВЧ диапазона.

## Введение

Интерес к системам с пониженной размерностью вызван, прежде всего, поиском физических явлений, которые могут послужить основой для создания новых устройств нанoeлектроники, в том числе, нанoeлектромеханики. Так, в квазиодномерных проводниках (КОП) с волной зарядовой плотности (ВЗП) наблюдаются необычные электромеханические эффекты, связанные с взаимодействием ВЗП и кристаллической решётки [1].

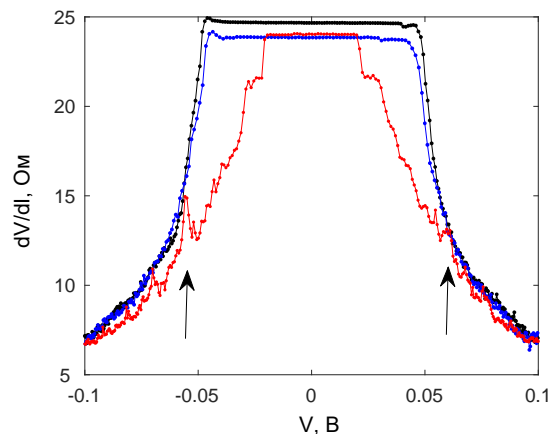
Недавно нами был обнаружен новый эффект: синхронизация скольжения ВЗП механическими вибрациями [2]. Показано, что воздействие периодической деформации на вискер квазиодномерного проводника TaS<sub>3</sub> аналогично воздействию электрического поля на той же частоте: на ВАХ наблюдаются особенности, аналогичные ступенькам Шапиро (СШ), и происходит подавление порогового поля срыва ВЗП.

## Эксперимент и результаты

Были изучены нелинейные ВАХ образцов КОП TaS<sub>3</sub>. Получены «дифференциальные ВАХ»,  $dV/dI$  от  $V$ , при различных частотах  $f$  ВЧ напряжения, приложенного к пьезоактюаторам. На рисунке 1 (красная кривая) показана зависимость, полученная при подаче ВЧ напряжения на актюаторы на резонансной частоте  $f = 1190$  кГц. В На ВАХ видны особенности, аналогичные СШ.

Такие же СШ наблюдаются при приложении переменного напряжения на той же частоте непосредственно к образцу (рис. 2). ВЧ напряжение подби-

ралась так, чтобы подавление порогового поля было таким же, как при синхронизации механическими колебаниями. При отклонении  $f$  от 1190 кГц особенности на ВАХ исчезают, если напряжение приложено к актюаторам (рис. 1, синяя кривая), в то время как вид и положение «обычных» СШ практически не изменяются (рис. 2). Это свидетельствует о механической природе СШ, представленных на рис. 1.

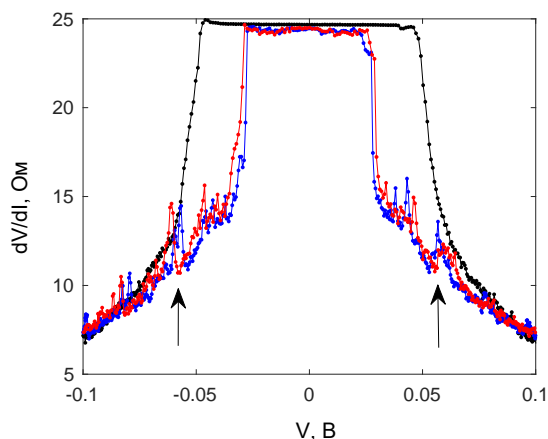


**Рис. 1.** Зависимости  $dV/dI$  от  $V$  при подаче ВЧ напряжения амплитудой 10 В на актюаторы. Чёрный цвет – ВАХ без вибрации, красный, –  $f = 1190$  кГц, синий –  $f = 1120$  кГц.  $T = 130$  К, растяжение образца - 0.01%

Оказалось, что ток «механических» СШ не всегда совпадает с током обычных СШ. Например, на частоте 1.19 МГц, ток ВЗП, соответствующий «механическим» СШ, меньше, чем «электрическим». Уменьшение тока СШ по сравнению с ожидаемым логичнее всего связать с неполной синхронизацией тока ВЗП. В случае «механических» СШ это может



быть зависеть от вида колебательной моды. Неоднородность амплитуды и вида деформации по сечению и длине может приводить к снижению степени синхронизации ВЗП. Во всех случаях отношение плотности тока ВЗП к  $f$  было в несколько раз ниже аналогичной величины («фундаментального отношения»), известной для наиболее совершенных образцах TaS<sub>3</sub>, 60-70 А/МГц/см<sup>2</sup> [3].



**Рис. 2.** Зависимости  $dV/dI$  от  $V$  при подаче ВЧ напряжения амплитудой 75 мВ на образец. Чёрный цвет – ВАХ без ВЧ напряжения, красный –  $f = 1190$  кГц, синий –  $f = 1120$  кГц.  $T = 130$  К, растяжение образца - 0.01%

Также получены первые результаты по синхронизации скольжения ВЗП механическими колебаниями в нановискерах NbS<sub>3</sub>-II, причём – при комнатной температуре. Образцы были расположены на подложке из ниобата лития с нанесёнными встречно-штыревыми преобразователями, создающими на её поверхности акустическую волну. Результат открывает новую область электромеханических эффектов в квазиодномерных проводниках с ВЗП и представляет эти соединения в качестве преобразователей механических колебаний нового типа.

## Обсуждение

Как известно [4,5], ступеньки Шапиро становятся заметными при модуляции тока ВЗП  $\sim 100\%$ . По нашим оценкам на основе тензорезистивного эффекта [1,2] модуляция тока в условиях нашего эксперимента не должна превышать 1%. Предположительно, столь сильная модуляция тока ВЗП происходит при совпадении частоты вибраций с фундаментальной частотой скольжения ВЗП, и её можно объяснить на языке колебаний частицы в периодическом потенциале в модели слабого пиннинга [2].

Остаётся и ряд других нерешённых вопросов: не выяснено, какие именно моды колебаний вызывают синхронизацию ВЗП. Кроме того, остаётся актуальной задача различать СШ на ВАХ, вызванные синхронизацией механическими колебаниями, и СШ, полученные в условиях синхронизации электрическим полем той же частоты, при расположении образцов на подложках из ниобата лития.

## Литература

1. В.Я. Покровский, С.Г. Зыбцев, М.В. Никитин, И.Г. Горлова, В.Ф. Насретдинова, С.В. Зайцев-Зотов // УФН, Т. 183, 33 (2013).
2. M.V. Nikitin, S.G. Zybtev, V.Ya. Pokrovskii and V.A. Loginov // Appl. Phys. Lett., V. 118, 223105 (2021).
3. S.E. Brown and G. Gruner // Phys. Rev. B, V. 31, 8302 (1985).
4. S.E. Brown, G. Gruner, and L. Mihály // Solid State Commun., V. 57, 165 (1986).
5. S.G. Zybtev, S.A. Nikonov, V.Ya. Pokrovskii, V.V. Pavlovskiy, and D. Starešinić // Phys. Rev. B, V. 101, 115425 (2020).

# Фотолюминесценция протяженных дефектов в монослое $WSe_2$

С.Н. Николаев<sup>1,\*</sup>, М.А. Чернопицкий<sup>1</sup>, В.С. Багаев<sup>1</sup>, И.И. Усманов<sup>2</sup>, Е.Е. Онищенко<sup>1</sup>, А.А. Деева<sup>2</sup>, В.С. Кривобок<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Ленинский просп. 53, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский переулок, 9, Долгопрудный, Московская область, 141701.

\*nikolaev-s@yandex.ru

Исследованы оптические свойства монослоя  $WSe_2$ , полученного механическим слоением с использованием золота. Показано, что при гелиевых температурах спектры излучения полученной пленки определяются стандартными механизмами излучательной рекомбинации с участием свободных экситонов, связанных экситонов и трионов. Методами оптической спектроскопии с микронным разрешением показано образование протяженных дефектов в такой пленке после отжига в вакууме при температуре 200 °С.

## Введение

Слоистые полупроводники являются ключевым компонентом, необходимым для создания атомарно-тонких электронных и оптоэлектронных приборов. Для создания гетероструктур на основе слоистых полупроводников необходимо получать большие по площади пленки толщиной от одного до нескольких монослоев. При помощи липкой ленты обычно удается получить чешуйки размером до 5 – 10 мкм, в то время, как латеральные размеры монослоев, полученных при помощи золота, могут достигать сотен микрометров. В данной работе исследовались дефекты в монослое  $WSe_2$ , полученном при помощи такой технологии.

## Методы и подходы

На объемный кристалл  $WSe_2$  лежащий на подложке, термическим испарением напылялся 100-150 нм слой золота. Атомы золота связываются с атомами Se верхнего слоя, причем это взаимодействие сильнее, чем силы Ван-дер-Ваальса между слоями  $WSe_2$ . Золото (с чешуйками  $WSe_2$ ) снималось с подложки при помощи термоотпускающей липкой ленты (thermal release tape) и переносилось на целевую подложку. После снятия липкой ленты и травления золота на Si/SiO<sub>2</sub> подложке оставались монослои  $WSe_2$  большого латерального размера (см. рис. 1 а). Для оптической спектроскопии использовалась установка на основе решеточного спектрометра, оснащенного ПЗС-матрицей. Образец размещался в гелиевом криостате, позволяющем работать в диапазоне температур 5 – 300 К. Фокусировка лазерного излучения (532 нм) и сбор люминес-

ценции осуществлялись микрообъективом, расположенным внутри криостата. Для смещения лазерного пятна по образцу использовалась схема 4f-сканнера. Такая схема позволяла проводить измерения спектров низкотемпературной фотолюминесценции с пространственным разрешением 1 – 2 мкм и проводить картирование сигнала люминесценции без относительного сдвига объектива и образца.

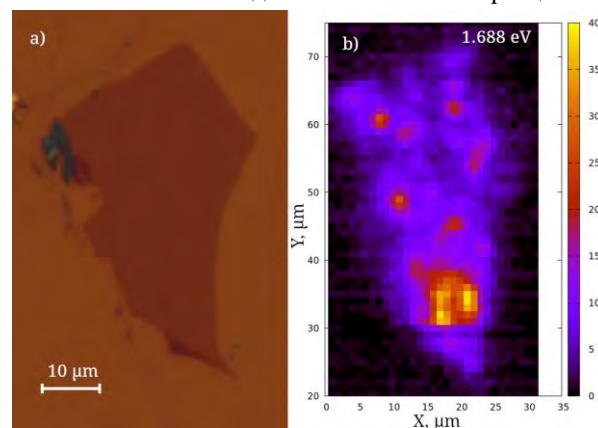
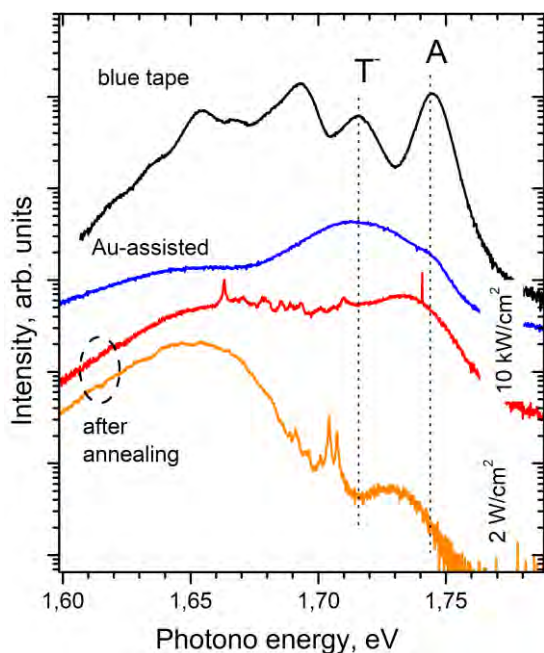


Рис. 1. Изображение монослоя  $WSe_2$ , полученного при помощи золота а) и пространственная карта ее люминесценции с энергией фотонов 1,688 эВ

## Обсуждение результатов

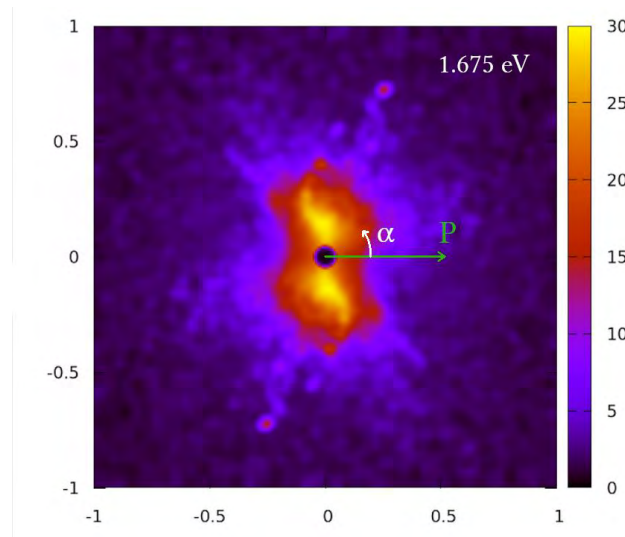
Спектры низкотемпературной (5К) фотолюминесценции (ФЛ) пленки, полученной при помощи золота, сопоставлялись с излучением чешуйки, полученной расщеплением липкой лентой (см. рис. 2). В спектрах излучения основного образца также наблюдаются линии излучения экситонов и трионов, но их спектральная ширина была заметно выше (см. рис. 2, синяя кривая). Кроме того, в этих спектрах наблюдалась большая относительная ин-

тенсивность трионов. Неоднородное уширение энергетического спектра в сочетании с увеличением концентрации свободных дырок может указывать на увеличение плотности вакансий Se, приводящих к n-легированию  $WSe_2$ .



**Рис. 2.** Спектры низкотемпературной (5 К) фотолюминесценции монослоя  $WSe_2$ , полученного при помощи липкой ленты (blue tape) и золота (Au-assisted). Красный и оранжевый графики соответствуют пленке после отжига

После низкотемпературного (200 °C) отжига пленки  $WSe_2$  в вакууме было проведено повторное исследование ее оптических свойств. Было обнаружено, что в спектре ФЛ кроме излучения экситонных состояний вблизи энергии 1,735 эВ, наблюдается выраженный пик при энергиях около 1,65 эВ, а иногда и узкие линии (красная кривая на рис. 2). При уменьшении плотности мощности с 10 кВт/см<sup>2</sup> до 2 Вт/см<sup>2</sup> это излучение начинает превалировать в спектре ФЛ (оранжевая кривая на рис. 2). Из спектров видно, что широкая полоса также содержит ряд узких линий, имеющих различное спектральное положение в разных точках образца. Карта люминесценции с энергией фотонов 1,688 эВ, представленная на рис. 1 б), демонстрирует наличие одиночных излучающих центров в монослое  $WSe_2$ . Приведённые выше данные указывают на дефектный характер регистрируемого излучения.



**Рис. 3.** Гистограмма распределения степени (P) и угла ( $\alpha$ ) поляризации ФЛ на энергии кванта света 1,675 эВ монослоя  $WSe_2$  при плотности лазерного возбуждения 2 Вт/см<sup>2</sup>

Из рис. 3 видно, что большая часть излучение дефектов слабо поляризована (степень поляризации  $< 0.5$ ), а угол поляризации меняется во всем диапазоне измерения (оранжевая область в центре). В то же время, излучатели с высокой степенью поляризации имеют предпочтительные углы поляризации с шагом около 60°. Мы связываем это излучение с протяженными дефектами в монослое  $WSe_2$ , привязанными к кристаллографии пленки. Одним из кандидатов на эту роль может быть линия вакансий, распространяющаяся вдоль зиг-заг направления решетки [1].

## Заключение

Таким образом, в данной работе исследовано излучение дефектов в монослое  $WSe_2$ , полученном про помощи золота. Показана высокая степень поляризации одиночных излучателей, люминесцирующих в области 1,65 эВ, которые возникают после низкотемпературного (200 °C) отжига. Продемонстрирована связь угла поляризации таких дефектов с кристаллографией пленки.

## Литература

1. Н.-Р. Komsa, S. Kurasch, O. Lehtinen, et al. // Physical Review B, V. 88, 035301 (2013).

# Остаточная фотопроводимость в двойных квантовых ямах HgTe

И.Д. Николаев<sup>1</sup>, Р.В. Менщиков<sup>2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>2</sup>, Д.Р. Хохлов<sup>1</sup>, А.В. Иконников<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991.

<sup>2</sup> ИФП СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*antikn@physics.msu.ru

В работе представлены результаты исследований спектров остаточной фотопроводимости (ОФП) в гетероструктурах HgTe/CdHgTe с двойными квантовыми ямами (ДКЯ). Показано, что наблюдаемые в спектрах особенности связаны с наличием покровного слоя CdTe и составом барьерных слоев Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te.

## Введение

Текущий интерес к КЯ HgTe вызван, прежде всего, первым обнаружением в них состояния двумерного топологического изолятора [1], что, по сути, открыло новый раздел физики конденсированного состояния. Помимо топологических свойств такие объекты также обладают и другими интересными свойствами, в частности биполярной ОФП [2, 3]. Данное свойство может использоваться для эффективного управления концентрацией носителей заряда без изготовления структур с затворами [4, 5].

В настоящей работе исследованы спектры ОФП в ДКЯ HgTe в диапазоне энергий 1,1–3,1 эВ и выполнено сопоставление наблюдаемых в спектрах особенностей с энергетической диаграммой ДКЯ.

## Методика эксперимента

Исследуемые образцы были выращены в ИФП СО РАН методом молекулярно-пучковой эпитаксии. На подложке из GaAs (013) выращивался буфер, состоящий из 30 нм слоя ZnTe и толстого (5–6 мкм) релаксированного слоя CdTe. Затем выращивалась активная часть структур: толщина барьеров Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te составляла 30 нм, толщина ям — 3–7,5 нм, а толщина туннельного барьера — 3 нм. Поверх всей структуры выращивался покровный слой CdTe толщиной 40 нм. ДКЯ были выбраны из-за ярко выраженного эффекта ОФП [4], а также из-за возможности обратимой смены типа проводимости в ряде случаев, чего пока не наблюдалось в одиночных КЯ [5].

Исследования спектров ОФП проводились с помощью монохроматора МДР-206 в диапазоне 400–1100 нм при  $T = 4,2$  К и 77 К. Образец находился во вставке в транспортном сосуде Дьюара. Излучение заводилось по полированной металлической трубе.

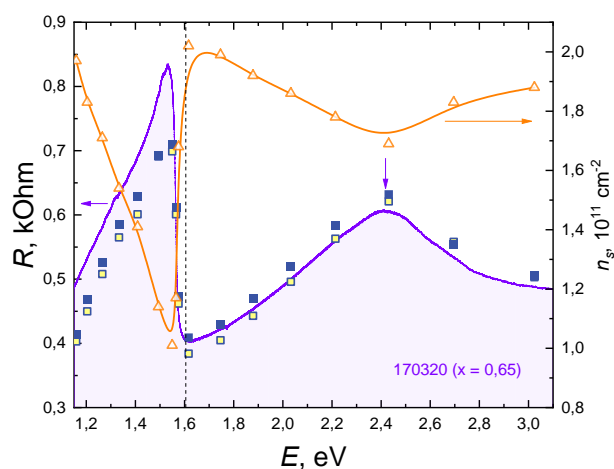
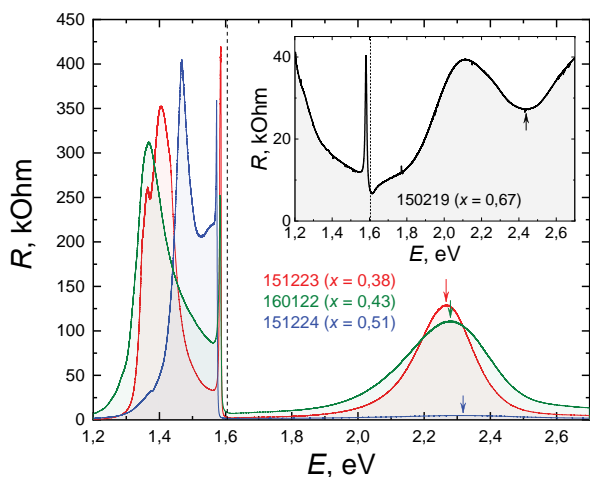


Рис. 1. Зависимость сопротивления при непрерывном и поточечном сканировании и концентрации носителей электронов при поточечном сканировании от энергии падающего излучения в образце 170320 при  $T = 4.2$  К. Открытые символы соответствуют включенной подсветке, сплошные — выключенной

Спектры записывались как при непрерывной подсветке и непрерывном сканировании со скоростью 10 нм/мин, так и поточечно как после включения, так и после выключения подсветки. «Направление» сканирования не оказывало никакого влияния на спектры. Концентрация в образцах определялась при помощи измерения квантового эффекта Холла (КЭХ), для этого образец размером 2×4 мм с нанесенными в холловской геометрии контактами помещался в центре сверхпроводящего соленоида ( $B_{max} = 6,2$  Тл).

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры ОФП в образце 170320. В спектре выделяются две особенности: 1 — резкое изменение сопротивления в районе 1,55 эВ и 2 — локальный максимум при 2,42 эВ.

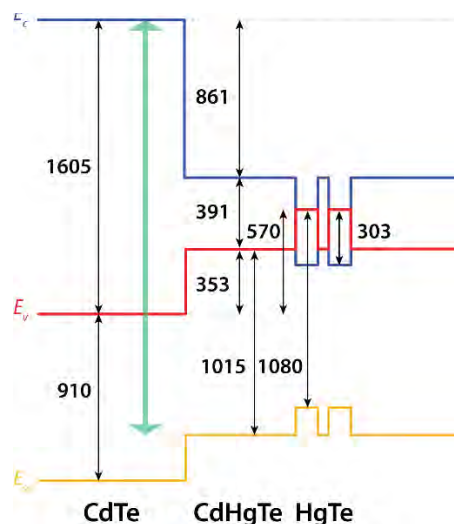


**Рис. 2.** Зависимость сопротивления различных образцов при непрерывном сканировании от энергии падающего излучения при  $T = 4.2$  К. Стрелками отмечены особенности в области 2,2–2,4 эВ

Данные особенности воспроизводятся при поточечном сканировании как при включённой, так и выключенной подсветке, что говорит именно об эффекте ОФП. Рассматриваемая структура имеет  $n$ -тип проводимости и достаточно высокую концентрацию электронов в КЯ (в том числе и в темновых условиях), это позволило наблюдать КЭХ во всем диапазоне энергий. «Зеркальная» зависимость концентрации от энергии падающего излучения (рис. 1) указывает на то, что изменение сопротивления вызвано изменением концентрации носителей заряда в КЯ.

Аналогичные особенности наблюдаются и в образцах с темновой проводимостью  $p$ -типа (рис. 2). При этом в образце 150219 (см. вставку) подсветка не приводит к смене типа проводимости, в остальных же образцах подсветка с энергиями  $\sim 1,2; 1,7; 2,6$  эВ приводит к появлению электронов в КЯ с концентрациями до  $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Как видно из рис. 2 указанные выше особенности спектров ОФП сохраняются, однако особенность 1 сопровождается резким пиком, а особенность 2 в «дырочном» образце 150219 представляет собой минимум.

Сопоставление энергий указанных особенностей с «энергиями слоев» структур (рис. 3) позволяет однозначно связать особенность 1 с покровным слоем CdTe. Чуть меньшая энергия особенности по сравнению с шириной запрещенной зоны  $E_g$  CdTe (штриховая линия на рис. 1, 2) возможно связана с проникновением ртути ( $\sim 2\%$ ) из барьеров. Повышение температуры до 77 К приводит к сдвигу особенности на 11–13 мэВ в сторону меньших энергий в соответствии с уменьшением  $E_g$  CdTe.



**Рис. 3.** Энергетическая диаграмма для образца 151223 при  $T = 4.2$  К. Энергии указаны в мэВ. Подложка справа (на рис. не показана). Зонные параметры взяты из работы [6]

Особенность 2, положение которой однозначно зависит от состава барьеров, связана с забросом электронов из спин-отщепленной зоны барьерного слоя CdHgTe в зону проводимости покровного слоя CdTe. Энергия такого перехода в точности соответствует положению особенности 2, с ростом  $x$  эта энергия возрастает. «Освободившиеся» места в спин-отщепленной зоне CdHgTe приводят к эффективному уменьшению концентрации электронов в КЯ (или увеличению концентрации дырок в случае образца 150219), что и приводит к изменению сопротивления.

Работа выполнена при поддержке РФФ (№ 22-22-00382). И.Д. Николаев благодарит за поддержку фонд «Базис» (№ 21-2-1-34-1).

## Литература

1. M. König, S. Wiedmann, C. Brune *et al.* // Science 318, 766 (2007).
2. К.Е. Спирин, Д.М. Гапонова, К.В. Маремьянин и др. // ФТП 52, 1482 (2018).
3. К.Е. Спирин, Д.М. Гапонова, В.И. Гавриленко и др. // ФТП 53, 1401 (2019).
4. A.V. Ikonnikov, M.S. Zholudev, K.E. Spirin *et al.* // Semicond. Sci. Tech. 26, 125011 (2011).
5. И.Д. Николаев, Т.А. Уаман Светикова и др. // Письма в ЖЭТФ 111, 682 (2020).
6. S.S. Krishtopenko, I. Yahnjuk, D.B. But *et al.* // Phys. Rev. B 94, 245402 (2016).



# Влияние химической природы имплантированных в систему SiO<sub>2</sub>/Si атомов на фотолюминесценцию ионно-синтезированного гексагонального кремния фазы 9R-Si

А.А. Никольская<sup>1</sup>, Д.С. Королев<sup>1</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1</sup>, А.И. Белов<sup>1</sup>, А.А. Конаков<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, А. Galeckas<sup>2</sup>, А.Ю. Азаров<sup>2</sup>, А.Ю. Кузнецов<sup>2</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> University of Oslo, PO Box 1048 Blindern, N-0316 Oslo, Norway.

\*tetelbaum@phys.unn.ru

Для использования кремния в приборах современной фотоники и оптоэлектроники необходимо улучшение его люминесцентных свойств. В связи с этим большое внимание привлекают гексагональные модификации кремния, для которых продемонстрировано повышение излучательной способности по сравнению с кубическим кремнием. Ранее было установлено возникновение пика фотолюминесценции ( $\lambda \approx 1240$  нм) при облучении системы SiO<sub>2</sub>/Si ионами K<sup>+</sup>, связанное с формированием гексагональной фазы 9R-Si. В настоящей работе проведено сравнение параметров ФЛ при облучении ионами As<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>, близкими по массе и атомному радиусу, но отличающимися по химической природе.

## Введение

Развитие электронной техники привело к необходимости использования световых сигналов для передачи данных с целью увеличения производительности интегральных схем. В связи с этим, кремниевая фотоника стала одним из быстро развивающихся направлений. Однако, до сих пор остается нерешенной проблема создания эффективного излучателя света на основе кремния, обусловленная непрямозонностью его энергетической структуры. Перспективным способом решения этой проблемы может стать использование аллотропных модификаций кремния гексагональной сингонии, для которых продемонстрировано улучшение люминесцентных свойств за счет изменения зонной структуры [1]. Поэтому необходимы поиски эффективных и совместимых с планарной технологией методов синтеза таких модификаций.

Ранее нами было показано, что при имплантации в систему SiO<sub>2</sub>/Si ионов K<sup>+</sup> с последующим отжигом, в подложке кремния на границе с пленкой SiO<sub>2</sub> формируются включения гексагональной фазы 9R-Si [2].

Для образцов с такими включениями была обнаружена фотолюминесценция (ФЛ) при 1240 нм, связанная с межзонным излучением 9R-Si [2].

В настоящей работе проведено сравнительное исследование ФЛ при 1240 нм для случая имплантации As<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>. Выбор As связан с тем, что массы атомов As и K (а также их атомные радиусы) весьма близки, а диффузионное поведение существенно разное. Таким образом, данное исследование позволяет судить о влиянии химической природы ионов на формирование фазы 9R-Si и ее люминесцентные свойства.

## Методика эксперимента

В качестве исходных образцов использовались структуры SiO<sub>2</sub> (160 нм)/Si, сформированные термическим окислением подложки КЭФ-4.5. Имплантация ионов K<sup>+</sup> и As<sup>+</sup> с энергией 80 кэВ и дозой  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> проводилась на ионном имплантере ИЛУ-200. Согласно расчетам в программе SRIM, средний проецированный пробег ионов составляет ~50 нм. Постимплантационный отжиг проводился в атмосфере осушенного N<sub>2</sub> при 800 °С (30 мин). После отжига пленка SiO<sub>2</sub> удалялась в HF.

Исследование свойств образцов проводилось методами ФЛ (при температуре 77 К с лазерным возбуждением при 408 нм), вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и спектроскопии резерфордского обратного рассеяния (РОР).



## Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены спектры ФЛ образцов  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после облучения  $\text{As}^+$  и  $\text{Kr}^+$  и отжига. В обоих случаях наблюдается интенсивный пик при  $\sim 1240$  нм, который наблюдался нами и ранее для образцов с 9R-Si фазой [2]. Как видно из рисунка, для образца, облученного ионами  $\text{As}^+$ , интенсивность ФЛ в максимуме примерно в 3 раза выше, чем для образцов, облученных ионами  $\text{Kr}^+$ . Положение максимума для образца, облученного  $\text{As}^+$ , несколько сдвинуто в сторону меньших длин волн (приблизительно на 5 нм).

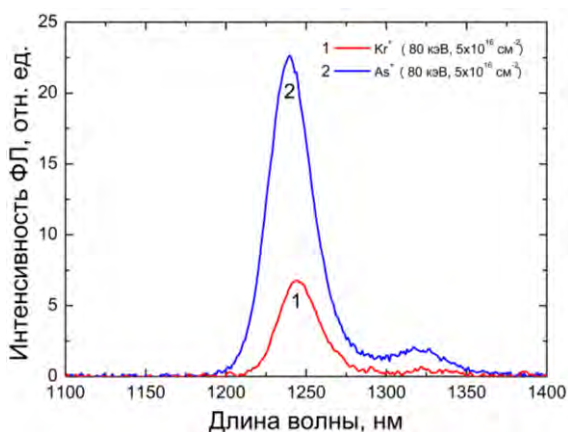


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , облученных  $\text{As}^+$  и  $\text{Kr}^+$  с последующим отжигом. Пленка  $\text{SiO}_2$  стравлена

Мы предполагаем [2], что формирование включений 9R-Si фазы, происходит за счет механических напряжений, возникающих в пленке и подложке при облучении, релаксация которых приводит к образованию новой фазы. При этом на интенсивность ФЛ также оказывают влияние радиационные дефекты (центры безызлучательной рекомбинации), возникающие в подложке при облучении. Так как в случае облучения системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  ионами  $\text{Kr}^+$  и  $\text{As}^+$  концентрации дефектов, возникающих в подложке, практически равны, для интерпретации полученных результатов важно учитывать различия в процессах, происходящих в пленке  $\text{SiO}_2$  во время постимплантационного отжига.

Согласно данным ВИМС и РОР, имплантированные атомы  $\text{Kr}$  испытывают при отжиге существенную десорбцию (аут-диффузию) из пленки  $\text{SiO}_2$ . Мышьяк же практически полностью остается в пленке. Из спектров РОР следует, что существен-

ного перераспределения мышьяка (из-за распыления при высокодозном облучении и/или из-за диффузии) не произошло. Таким образом, связанные с присутствием ионов мышьяка напряжения остаются практически неизменными в течение всего времени отжига. Это означает, что процессы в приграничном слое  $\text{Si}$ , связанные с действием напряженной пленки на подложку, обусловленным присутствием атомов  $\text{As}$ , также протекают в течение всего времени отжига, тогда как в случае  $\text{Kr}^+$  эти процессы ослабевают со временем вследствие десорбции  $\text{Kr}$ . Поэтому резонно полагать, что процесс фазообразования в случае облучения  $\text{As}$  приводит к накоплению большего результирующего количества фазы 9R-Si, что и служит причиной более интенсивной ФЛ.

Причина «синего» сдвига положения пика ФЛ для  $\text{As}^+$  требует отдельного рассмотрения. Можно предположить, что этот сдвиг связан с квантово-размерным эффектом [3]. Действительно, если в случае  $\text{Kr}^+$  нановключения образуются в основном в начальной стадии отжига, а за остальное время отжига они имеют возможность лишь укрупняться за счет процесса «созревания», это может приводить к уменьшению квантово-размерного сдвига. В случае же  $\text{As}^+$  те включения, которые образовались на более поздних стадиях отжига, не имеют достаточного времени для укрупнения, поэтому средний размер нановключений должен быть меньше, следовательно кванто-размерный сдвиг для таких включений выражен в большей степени.

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-32-90204) и гранта Президента РФ (МК-4092.2021.1.2). Никольская А.А. признательна за поддержку в рамках Стипендии Президента РФ (СП-1894.2021.5).

## Литература

1. L. Fan, D. Yang, D. Li // *Mater.*, V. 14, 3964 (2021).
2. A.A. Nikolskaya, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov *et al.* // *Appl. Phys. Lett.*, V. 113, 182103 (2018).
3. T.Y. Kim, C. Huh, N.M. Park *et al.* // *Nanoscale Res. Lett.*, V. 7(634), 1–5 (2012).

# Моделирование процессов самоотжига филаментных структур в мемристорах на основе пленок $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>, подвергнутых облучению ионами Si<sup>+</sup>

Е.В. Окулич<sup>1, \*</sup>, В.И. Окулич<sup>2</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603022.

<sup>2</sup> НИУ РАНХиГС, пр. Гагарина, 46, Нижний Новгород, 603950.

\*eokulich@nifti.unn.ru

Эволюция дефектной структуры пленки SiO<sub>1.7</sub>, вызванная имплантацией ионов Si<sup>+</sup> и последующим отжигом при 1500 К в течение 100 нс, смоделирована с использованием двух методов: кинетического Монте-Карло и молекулярной динамики. При выбранной дозе имплантации ионов 1·10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> обнаружена кластеризация атомов кремния и изменение ближнего порядка. Результаты обсуждаются в рамках задачи ионной модификации оксида кремния с целью использования последнего в качестве перспективного функционального диэлектрика в мемристорах, а также могут быть применены при исследовании микроскопических механизмов, ответственных за процессы электроформовки и резистивного переключения.

## Введение

Выяснение природы стохастичности характеристик мемристивных структур на основе тонких пленок оксидов является актуальной задачей. Сформировалось устойчивое мнение об определяющем влиянии на характеристики мемристоров дефектов рабочего слоя [1, 2]. Однако природа этих дефектов остается малоизученной.

Поскольку установлено, что в зоне проводящего канала – филамента (5 – 20 нм) – температура в проводящем состоянии может достигать более 1000 К [3, 4], то можно предполагать наличие процесса самоотжига дефектных структур в этой области.

В настоящей работе представлены результаты моделирования этого процесса для мемристоров на основе пленок аморфного SiO<sub>2</sub>.

В ряде работ [5, 6] было обнаружено положительное влияние ионного облучения на параметры резистивного переключения в структурах на основе пленок оксида кремния, поэтому моделирование проводилось именно для легированных ионами Si<sup>+</sup> пленок.

## Метод расчета

Начальной задачей моделирования было создание структуры (размером 60×60×60 Å<sup>3</sup>), насыщенной атомами кремния за счет облучения ионами Si<sup>+</sup> с заданной дозой на определенной глубине, а также

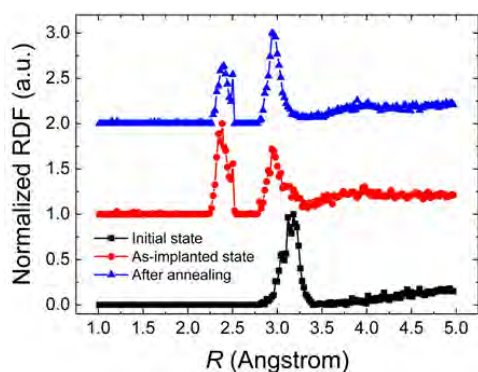
содержащей дефекты, созданные ими. Предполагается, что такая структура представляет из себя область филамента. Расчет числа дефектов производился в программе SRIM. При этом глубина аморфного SiO<sub>1.7</sub> задавалась равной 20 нм, дозы составили 1·10<sup>15</sup> и 1·10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>, энергия внедряемых ионов Si<sup>+</sup> – 20 кэВ. Соответствующее число вакансий атомов Si и O создавалось их случайным удалением, а междоузельные атомы – их случайным внедрением при выполнении того условия, что расстояние между двумя атомами не должно было быть меньше суммы атомных радиусов соответствующих соседей. Процессы атомной перестройки при самоотжиге моделировались методом молекулярной динамики с использованием пакета LAMMPS при температуре 1500 К.

Координаты атомов кластеров периодически фиксировались, общее время расчета составляло ~ 100 нс. Проводилась оценка структурных характеристик моделируемого объема с использованием специально написанного комплекса программ. Это позволило наблюдать эволюцию числа, взаимного расположения скоплений атомов кремния, размеров кластерных образований и основных структурных единиц аморфного диоксида кремния типа Si-O<sub>4</sub>.

В рамках исследований рассчитывались радиальные функции распределения (РФР) атомов как отмеченных образований, так и моделируемого объема в целом, а также углы между связями.

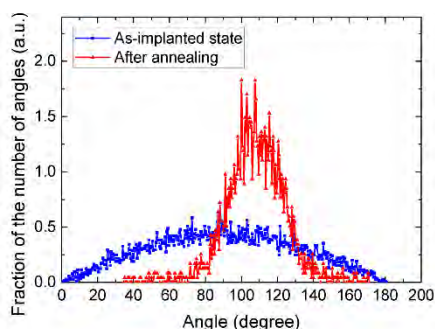
## Результаты и обсуждение

На рис. 1 показана нормированная РФР связей Si-Si для моделируемого фрагмента до имплантации (исходное состояние), после имплантации и после отжига при 1500 К в течение 100 нс. Для исходного состояния положение пика ( $R = 3.19 \text{ \AA}$ ) примерно соответствует литературному значению для термических пленок SiO<sub>2</sub>. После имплантации этот пик сохраняется, уменьшаясь по высоте и площади и становясь резко асимметричным. Появляется второй пик при  $R = 2.38 \text{ \AA}$ , что связано с введением дополнительных атомов кремния.



**Рис. 1.** Нормированные РФР расстояний Si-Si в исходном SiO<sub>1.7</sub> (черная кривая), после имплантации (красная кривая) и после отжига при 1500 К в течение 100 нс (синяя кривая)

В результате отжига кластеры Si приближаются по структуре к кристаллическому кремнию, для которого  $R_{\text{Si-Si}} = 2.34 \text{ \AA}$  и валентный угол равен  $\sim 109^\circ$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределения валентных углов, сформированных в моделируемом объеме филамента в состоянии после имплантации (синяя кривая) и после отжига в течение 100 нс (красная кривая)

Изменение положения пика для SiO<sub>2</sub> ( $2.9 \text{ \AA}$ ) после отжига (рис. 1) может быть связано с остаточными дефектами. Предполагается, что по причине наличия последних более плотная структура оксида становится энергетически выгоднее. Однако это предположение требует дополнительного исследования из первых принципов.

## Заключение

Проведенный в данной работе расчет показал возможность существенной перестройки структуры слоя аморфного SiO<sub>2</sub> в филаменте, зависящей от концентрации внедренного ионной имплантацией кремния. Такие процессы сопровождаются случайным и постоянным образованием электронных ловушек в локальной области. Мы предполагаем, что именно они могут быть ответственны за стохастичность процесса резистивного переключения, шумовые характеристики и, в конечном счёте, деградацию мемристора.

Работа поддержана Правительством Российской Федерации (контракт № 075-15-2019-871 (2)) и выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Н-466-99\_2021-2023).

## Литература

1. A.N. Mikhaylov, D.V. Guseinov, A.I. Belov *et al.* // *Chaos, Solitons & Fractals*, V. 144, 110723 (2021).
2. D.V. Guseinov, D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov *et al.* // *International Journal of Nanotechnology*, V. 14(7/8), 604 (2017).
3. D.G. Pahinkar, P. Basnet, M.P. West *et al.* // *AIP Advances*, V. 10, 035127 (2020).
4. Y. Ma, D. Li, A.A. Herzing *et al.* // *ACS Applied Materials and Interfaces*, V. 10(27), 23187 (2018).
5. E.V. Okulich, V.I. Okulich, D.I. Tetel'baum // *Technical Physics Letters*, V. 46, 19 (2020).
6. T.-J. Yen, A. Chin, V. Gritsenko // *Nanomaterials*, V. 11(6), 1401, (2021).

# Реализация концепции полярного металла в Ван дер Ваальсовых структурах

Н.Н. Орлова<sup>1§</sup>, А.В. Тимонина<sup>1</sup>, Н.Н. Колесников<sup>1</sup>, Э.В. Девятков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела РАН, ул. Академика Осипяна, 2, Черноголовка, 142432.

§honna@issp.ac.ru

В последнее время материалы с нарушением инверсии, демонстрирующие сосуществование проводимости и ферроэлектрического упорядочения, привлекают большой интерес. Мы исследовали взаимное влияние ферроэлектричества и проводимости в таких системах. Для топологического Вейлевского полуметалла  $WTe_2$  мы продемонстрировали возможность управлять ферроэлектрической поляризацией полем тока носителей заряда. Существенность эффектов нарушения симметрии была нами продемонстрирована в транспортных экспериментах на проводящем ферроэлектрике  $SnSe$ , где с помощью локального нагрева электрическим током удалось инициировать фазовый переход  $SnSe$  в симметричную фазу, известную для  $SnSe$ , где ферроэлектрическая поляризация не наблюдается. Благодаря сосуществованию проводимости и ферроэлектрического упорядочения, нам впервые удалось реализовать электрокалорический эффект в проводящей ферроэлектрической системе.

## Введение

В последнее время эффекты нарушения симметрии в твердом теле привлекают особенное внимание благодаря исследованиям в области топологических полуметаллов. В Вейлевских полуметаллах, в силу нарушения пространственной симметрии или симметрии по обращению времени, каждая Дираковская точка (представляющая собой специальную точку зоны Брюллиэна с трёхмерным линейным спектром) расщепляется на два Вейлевских узла с противоположными киральностями [1].

Оба варианта широко исследуются в системах с нарушением пространственной инверсии и в системах с ферромагнитным упорядочением, соответственно.

С другой стороны, материалы с нарушением инверсии известны тем, что демонстрируют ферроэлектрическое упорядочение. Недавно ферроэлектрическая поляризация была экспериментально обнаружена в Вейлевском полуметалле  $WTe_2$ , обладающем значительной объёмной проводимостью в силу бесщелевого спектра [2] [3]. Обычно ферроэлектрические свойства рассматривались для диэлектриков, однако демонстрация ферроэлектричества в  $WTe_2$  доказала реализуемость теоретической концепции полярного металла [4].

Сосуществование проводимости и спонтанной поляризации в полярном металле дает возможность как управления поляризацией полем электрического тока, так и проводимостью материала за счет изменения ферроэлектрической поляризации.

## Полученные результаты

В данной работе мы исследуем взаимное влияние ферроэлектричества и проводимости в таких системах. Благодаря слоистой структуре рассматриваемых материалов наши образцы были изготовлены с помощью техники механической эксфолиации, аналогичной используемой для большинства Ван-дер-Ваальсовых структур.

Для топологического Вейлевского полуметалла  $WTe_2$  мы продемонстрировали возможность управлять ферроэлектрической поляризацией полем тока носителей заряда. Изменение поляризации проявляется как гистерезис на кривых дифференциального сопротивления в зависимости от направления развортки тока, при этом влияние непосредственно ферроэлектрического упорядочения доказано зависимостью от затворного напряжения при тех напряжениях поля затвора, что существенно не меняют концентрацию носителей в образце.

Существенность именно эффектов нарушения симметрии была нами продемонстрирована в транспортных экспериментах на проводящем ферроэлектрике  $SnSe$ . Для этого с помощью локального нагрева электрическим током удалось инициировать фазовый переход  $SnSe$  в симметричную фазу, известную для  $SnSe$  при умеренно высоких температурах.

В результате мы наблюдали что, гистерезис в транспортном токе в исходной фазе  $SnSe$ , полностью аналогичный наблюдаемому в  $WTe_2$ , исчезает при фазовом переходе в симметричную фазу.

Благодаря сосуществованию проводимости и ферроэлектрического упорядочения, нам впервые удалось реализовать электрокалорический эффект в проводящей ферроэлектрической системе. Термо-эдс измерялось как отклик на второй гармонике на нагрев переменным током, при этом в системе было приложено так же и постоянное электрическое поле. На кривых термоэлектрического отклика в зависимости от постоянного поля наблюдалась характерная для электрокалорического эффекта гиперболическая зависимость термо-эдс с резким переходом из максимума в минимум в нуле при смене полярности.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00229, <https://rscf.ru/project/22-22-00229/>

## Литература

1. N. P. Armitage, E. J. Mele, and A. Vishwanath, *Rev. Mod. Phys.*, 90, 15001 (2018).
2. P. Sharma, F.-X. Xiang, D.-F. Shao, D. Zhang, E. Y. Tsymlal, A. R. Hamilton, *Sci. Adv.*, 5, eaax5080 (2019).
3. Z. Fei, W. Zhao, T. A. Palomaki, B. Sun, M. K. Miller, Z. Zhao, J. Yan, X. Xu and D.H. Cobden, *Nature*, 560, 336 (2018).
4. W. X. Zhou and A. Ariando, *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, SI0802 (2020).

# Определение типов оптических переходов по зависимости интенсивности фотолюминесценции от мощности возбуждения в компенсированных полупроводниках

И.В. Осинных<sup>1, 2, \*</sup>, И.А. Александров<sup>1</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, Д.С. Милахин<sup>1</sup>, К.С. Журавлёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

\*igor-osinnykh@isp.nsc.ru

Проведен расчет зависимости интенсивности зона-акцепторного и донорно-акцепторного каналов фотолюминесценции от мощности возбуждения на основе решения системы уравнений непрерывности совместно с уравнением электронейтральности для стационарного случая. По сопоставлению экспериментальных зависимостей полос ФЛ сильно легированного AlN:Si от мощности возбуждения с расчетными определены типы оптических переходов и степень компенсации. Согласно расчету концентраций дефектов вероятный кандидат на роль акцептора комплекс  $V_{Al}-2Si$ .

## Введение

$Al_xGa_{1-x}N/GaN$  гетероструктуры являются перспективными для создания оптоэлектронных и мощных высокотемпературных силовых и СВЧ приборов. Светоизлучающих приборов видимой и ультрафиолетовой области спектра. Формирование эпитаксиальных слоев GaN и  $Al_xGa_{1-x}N$  с низким содержанием Al n-типа проводимости с использованием кремния (Si) в качестве донора не вызывает существенных трудностей, концентрация электронов может быть управляемо повышена до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Однако при легировании  $Al_xGa_{1-x}N$  с высоким содержанием Al (>0.6) происходит самокомпенсация кремния. Компенсирующими центрами являются отрицательно заряженные катионные вакансии ( $V_{III}$ ) и их комплексы с мелкими донорами. Явление компенсации сопровождается появлением интенсивной широкополосной люминесценции в видимом спектральном диапазоне [1]. Предполагается, что рекомбинация идет через компенсирующие центры, однако остается неизвестным элементный состав и концентрация этих центров. Также не установлено соотношение между типами оптических переходов через центры. В настоящей работе представлены результаты расчетной и экспериментальной зависимости фотолюминесценции от мощности возбуждения для сильнолегированных слоев AlN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сапфировых подложках.

## Методики расчета и эксперимента

Расчет зависимости интенсивности различных каналов фотолюминесценции от мощности возбуждения был проведен на основе решения системы уравнений непрерывности совместно с уравнением электронейтральности для стационарного случая в математическом пакете Wolfram Mathematica. Был рассмотрен случай, когда энергия фотонов меньше ширины запрещенной зоны, при этом происходит поглощение света на уровнях акцепторов и выброс электронов в зону проводимости. В модели имеется два канала излучательной рекомбинации – зона-акцепторная (eA) и донорно-акцепторная (DA) рекомбинация с участием одного типа глубоких акцепторов. Рассмотрены три случая компенсации: 1) доноров больше, чем акцепторов ( $N_D > N_A$ ), 2) концентрации доноров и акцепторов равны ( $N_D = N_A$ ), 3) доноров меньше, чем акцепторов ( $N_D < N_A$ ). Модель универсальная и может быть использована для любых компенсированных полупроводников. В данной работе модель применялась для видимой фотолюминесценции (ФЛ) в AlN:Si с уровнем легирования  $1.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . При измерении ФЛ в широком диапазоне генерации носителей заряда использовалась возбуждение 4-ой гармоникой стационарного YAG лазера ( $\lambda=266 \text{ нм}$ ), максимальная плотность мощности составляла  $6 \text{ Вт/см}^2$ . Спектры измерялись при комнатной температуре. Концентрации дефектов рассчитывались в модели термоди-



намического равновесия. Энергии образования дефектов были рассчитаны с использованием теории функционала плотности (DFT) с гибридным функционалом HSE в программном пакете Quantum ESPRESSO [2].

## Результаты и обсуждение

Согласно расчетам темп DA канала рекомбинации при всех случаях компенсации возрастает линейно с ростом плотности мощности возбуждающего излучения (J) и выходит на постоянный уровень при достижении критического значения плотности мощности, соответствующего насыщению выброса электронов с уровней акцепторов. Зависимость темпа рекомбинации eA канала от плотности мощности возбуждающего излучения до достижения критического уровня зависит от компенсации: квадратичная при  $N_D > N_A$ , показательная с показателем степени 1.5 при  $N_D = N_A$ , линейная при  $N_D < N_A$ . При плотности мощности возбуждающего излучения выше достижения критического уровня темп рекомбинации eA канала также выходит на постоянный уровень во всех случаях компенсации.

Спектры ФЛ AlN:Si состоят из трех полос в видимой области спектра: ультрафиолетовой полосы (UV), фиолетовой полосы (V) и оранжевой полосы (O) с положением максимума около 3,7, 3,1 и 2,0 эВ, соответственно. Энергия фотонов возбуждающего излучения  $h\nu = 4,7$  эВ значительно ниже  $E_g = 6,015$  эВ, межзонное поглощение света невозможно, происходит только поглощение света на уровнях акцепторов и выброс электронов в зону проводимости. O полоса наблюдалась ранее в нелегированном AlN [2], V и UV полосы в AlN наблюдаются только при сильном легировании Si [3]. На рис. 1 приведены зависимости интенсивности V и UV полос ФЛ от плотности мощности возбуждения. Для обеих полос характерен монотонный рост интенсивности с перегибом в районе  $J = 1$  Вт/см<sup>2</sup>. Интенсивность V полосы до и после перегиба возрастает линейно, интенсивность UV полосы возрастает по сверхлинейному закону, аппроксимация показательной функцией вида  $y = Ax^b$  дает показатель степени  $b = 1,33$ , наиболее близкий к расчетному значению 1,5 соответствующий eA рекомбинации в случае полной компенсации. Таким образом можно сделать вывод о том, что UV и V полосы обусловлены eA и DA рекомбинацией, соответственно. Пе-

региб в зависимости обеих полос скорее всего связан с наличием другого акцептора, ответственного за O полосу, который также дает вклад в генерацию неравновесных электронов, но концентрация которого низка по сравнению с основными, вследствие чего насыщение генерации на нем происходит быстрее.

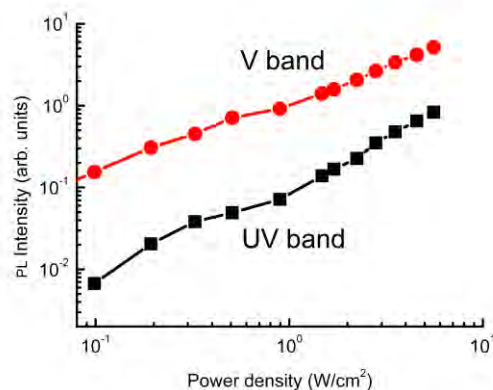


Рис. 1. Зависимость интенсивности V и UV полос ФЛ от плотности мощности возбуждения при комнатной температуре

Согласно расчетам большинство атомов Si образует комплексы  $V_{Al}-3Si_{Al}$ , концентрация этих дефектов около  $5 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup> на порядок выше концентрации доноров  $Si_{Al}$ , которая около  $2 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, а также положение максимума люминесценции для переходов через уровни  $V_{Al}-3Si_{Al}$  должно быть примерно 3,56 эВ, что выше наблюдаемого положения максимума ФЛ. Комплексы  $V_{Al}-2Si_{Al}$  имеет концентрацию порядка  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> наиболее близкую к концентрации доноров  $Si_{Al}$ , а также положение максимума люминесценции, близкие к 3,0 эВ, поэтому является наиболее вероятным кандидатом на роль акцептора.

## Литература

1. P. A. Bokhan, P. P. Gugin, Dm. E. Zakrevsky, K. S. Zhuravlev, T. V. Malin, I. V. Osinnykh, V. I. Solomonov, and A. V. Spirina // J. Appl. Phys., 116, 113103 (2014).
2. I.A. Aleksandrov, and K. S. Zhuravlev // J. Phys.: Condens. Matter, 32, 435501 (2020).
3. I. V. Osinnykh, T. V. Malin, V. F. Plyusnin, K. S. Zhuravlev, B. Ya. Ber and D. Yu. Kazantsev // J. Phys.: Conf. Ser., 816, 012002 (2017).

# Трансформация N-полярных инверсионных доменов из буферных слоев AlN в процессе роста слоев AlGaN

И.В. Осинных<sup>1, 3, \*</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, А.С. Кожухов<sup>1</sup>, К.С. Журавлёв<sup>1</sup>, Б.Я. Бер<sup>2</sup>, Д.Ю. Казанцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

\*igor-osinnykh@isp.nsc.ru

В настоящей работе проведено исследование влияния N-полярных инверсионных доменов в буферных слоях AlN на дефектообразование в Me-полярных слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$  с высокой концентрацией кремния. Показано, что инверсионные домены, содержащиеся в слоях AlN, при последующем росте слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  не прорастают до поверхности, а меняют азотную полярность на металлическую.

## Введение

Нитриды металлов III группы и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны от 3.4 до 6.2 эВ, обладающие высокой теплопроводностью, благодаря чему они являются перспективными материалами оптоэлектроники и сильноточной высокотемпературной электроники. Приборные III-нитридные гетероструктуры получают эпитаксиальными методами, рост III-нитридов на подложке сапфира связан с рядом технологических трудностей ввиду большого рассогласования параметров кристаллической решетки подложки сапфира и выращиваемой пленки AlN/GaN, равного, а также коэффициентов температурного расширения сапфира, что приводит к высокому содержанию протяженных дефектов (до  $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), основными дефектами являются дислокации, дефекты упаковки в базовой плоскости, инверсионные домены (ИД). В частности важной задачей является получение полярно однородных слоев: азотной (N) или металлической (Me) полярности. Решением проблем роста является использование буферных слоев AlN или GaN, при этом важно учитывать, что дефекты в буферных слоях могут прорасти до поверхности всей структуры [1]. В работе [2] установлено, что нитридизация сапфира с формированием на его поверхности  $\sim 1$  монослоя AlN обеспечивает последующий рост слоев AlN с более гладкой поверхностью и лучшим кристаллическим совершенством по сравнению нитридизацией сапфира, формирующей более толстый ( $\sim 2$  монослоя) слой AlN. В рамках данной работы было исследовано влияние

инверсионных доменов в буферных слоях AlN на дефектообразование в слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$  с высокой концентрацией кремния.

## Методики расчета и эксперимента

Была выращена серия слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$  с высокой концентрацией кремния, методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке фирмы Riber CBE-32. В качестве источника галлия и алюминия использовались стандартные эффузионные ячейки, в качестве источника активного азота использовался аммиак. Легирование слоев осуществлялось кремнием (Si) из газового источника моносилана ( $\text{SiH}_4$ ), разбавленного азотом ( $\text{N}_2$ ) в соотношении 7/1000. В качестве подложек использовались (0001) ориентированные односторонне и двусторонне полированные 2" пластины сапфира толщиной 400 мкм. Сапфир нитридизовался в потоке аммиака аммиака  $25 \text{ см}^3/\text{мин}$  при температуре  $960^\circ\text{C}$  в течение 10 минут, после чего на нитридизованную подложку сапфира наносился субмонослой ( $\sim 2$  монослоя) металлического алюминия, далее выращивался буферный слой AlN толщиной  $\sim 200$  нм при температуре  $985^\circ\text{C}$  и на заключительном этапе исследуемые слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  толщиной  $\sim 500$  нм. Содержание алюминия ( $x_{\text{Al}}$ ) в слоях задавалось соотношением потоков Al/Ga в процессе роста и контролировалось методом спектроскопии пропускания света, по серии оно менялось от 0 до 0.7. Температура роста составила  $835^\circ\text{C}$  для GaN,  $930^\circ\text{C}$  для  $0 < x < 0.42$  и  $965^\circ\text{C}$  для составов с большим содержанием Al. В процессе роста структурное совершенство, тип кристаллической решетки, полярность

слоев, скорость и мода роста слоев контролировались дифракцией быстрых электронов на отражении (ДБЭ). Морфология поверхности была исследована методами атомно-силовой микроскопии (АСМ). АСМ изображения были получены на атомно-силовом микроскопе Solver P-47H (NT MDT) в полуконтактном режиме, обеспечивающем вертикальное разрешение микроскопа, равное 0.05 нм. Концентрации Si и фоновых примесей (O, C) измерялись методом динамической вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с использованием вторично-ионного микрозонда CAMECA IMS 7f.

## Результаты и обсуждение

По данным ДБЭ поверхность буферных слоев AlN имеет металлическую полярность, о чем свидетельствуют рефлексы (2×2) поверхностной реконструкции на дифракционной картине, однако на АСМ изображениях видны N-полярные ИД высотой 30 – 50 нм и диаметром порядка 0.3 мкм, занимающие около 15% площади поверхности слоев. Травление в 5% растворе КОН при температуре 50° С в течение 1 минуты приводит к исчезновению ИД и замене их глубокими провалами такого же диаметра и глубиной порядка 100 нм.

Поверхность GaN имеет блочную структуру, диаметр блоков составляет около 0.5 мкм. Блоки отделены друг от друга провалами шириной порядка 0.2 мкм. Диаметр блоков возрастает с повышением доли алюминия до 2.4 мкм при  $x_{Al} = 0.36$  и блоки начинают смыкаться. Дальнейший рост содержания алюминия (выше 0.42) приводит к повышению шероховатости поверхности, на ней появляются плато высотой 10 – 15 нм и плотностью около  $4 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$ . При  $x_{Al} = 0.62$  их диаметр около 1.5 мкм, при  $x_{Al} = 0.7$  диаметр этих дефектов уменьшается до 1.1 мкм. Поскольку исходная поверхность буферного слоя AlN характеризовалась высокой плотностью инверсионных доменов, было предположено, что данные дефекты представляют собой наследие инверсионных доменов. Однако в отличие от инверсионных доменов они не стравливаются в КОН и, следовательно, имеют Me-полярность. Таким образом, N-полярные ИД меняют полярность в ходе роста AlGaN:Si.

Концентрация атомов кремния в серии слоев AlGaN была около  $(4.0 - 8.0) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , концентра-

ция фоновых примесей на порядок ниже. Концентрация С и О в буферном слое AlN выше, чем в слое AlGaN:Si. В GaN:Si концентрация О и С на порядок меньше, чем в буферном слое AlN, по мере увеличения содержания Al отношение концентраций кислорода в AlGaN:Si и буферном AlN сокращается до 4 раз при  $x=0.7$ , а отношение средних концентраций углерода сравнивается при  $x \sim 0.36$ . Известно, что концентрация атомов О существенно отличается для AlGaN различной полярности, в N-полярных слоях GaN концентрация кислорода более чем на порядок выше, чем в Me-полярном материале, что отображается на экспериментальном профиле распределения для фоновой примеси кислорода, полученном методом ВИМС. Для определения глубины прорастания ИД в слое  $Al_xGa_{1-x}N$  были сравнены профили распределения основных химических элементов Ga, Al и фоновой примеси О. Совпадение гетерограницы и положение скачка концентрации кислорода означает, что на гетерогранице ИД меняют полярность с азотной на металлическую и далее растут, имея ту же полярность что и изначально Me-полярная матрица.

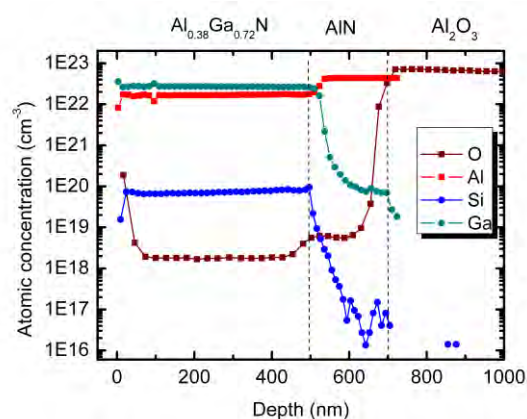


Рис. 1. Типичные профили распределения основных химических элементов (Ga, Al), легирующей примеси (Si) и фоновой примеси (O) в структуре  $Al_{0.36}Ga_{0.72}N/AlN/Al_2O_3$

## Литература

1. A. V. Tikhonov, T. V. Malin, K. S. Zhuravlev, L. Dobos, and B. Pecz. *J. Crystal Growth* // 338, 30 (2012).
2. Т. В. Малин, Д. С. Милахин, В. Г. Мансуров, Ю. Г. Галицын, А. С. Кожухов, В. В. Ратников, А. Н. Смирнов, В. Ю. Давыдов, К. С. Журавлёв // ФТП, 52, 643 (2018).

# Влияние параметров индуктивно-связанной плазмы хлорпентафторэтана на скорость и характеристики травления арсенида галлия

А.И. Охупкин\*, С.А. Краев, Е.А. Архипова, П.А. Юнин, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, М.Н. Дроздов

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, дер. Афонино Кстовского района Нижегородской области, 603087.

\*andy-ohapkin@yandex.ru

Изучено влияние потока реагента, давления, ёмкостной, индуктивной мощности и времени цикла на скорость и характеристики травления арсенида галлия в плазме хлорпентафторэтана. Оказалось, что увеличение потока фреона не приводит к изменению скорости травления арсенида галлия. Увеличение ёмкостной мощности способствует увеличению скорости процесса в несколько раз, однако на стенках профиля травления появляется слой продуктов пассивации с неравномерными контурами. При снижении индуктивной мощности уменьшается анизотропия травления; а полное выключение генератора ICP способствует развитию шероховатости поверхности и появлению на маске неоднородностей в виде «чешуек». С ростом давления в реакторе, скорость травления уменьшается в виду уменьшения свободного пробега реакционных частиц плазмы. При пониженном давлении на поверхность подложки выпадают единичные крупные неоднородности, которые встречаются как на маске, так и на протравленных элементах. Проведение травления GaAs в непрерывном режиме существенно ухудшает степень анизотропии по сравнению с импульсным травлением.

## Введение

Арсенид галлия - прямозонный полупроводник с высокой подвижностью носителей заряда, на базе которого изготавливаются приборы, стойкие к радиационным дефектам и работающие в условиях высоких нагрузок. Одним из таких устройств является вертикальный полевой транзистор на основе GaAs с управляемым р-п переходом. Имеется ряд требований к методам изготовления такого транзистора, в частности необходимо сформировать вертикальный канал в GaAs. Обычное жидкостное травление в данном случае не подходит, ввиду наличия большого бокового подтравы под маску. Провести анизотропное травление можно плазмохимическим методом; однако если при этом использовать в качестве реагента химически активные газы, такие как хлор; это может привести к нарушению стехиометрии приповерхностного слоя. В результате дальнейшие процессы формирования структуры (в частности, металлоорганическая газофазная эпитаксия) станут невозможными. В этой связи необходимо подобрать плазмообразующие газы с минимальным воздействием на поверхность при травлении. Одним из таких веществ является хлорпентафторэтан ( $C_2F_5Cl$ ).

В данной работе изучалось влияние параметров индуктивно-связанной плазмы  $C_2F_5Cl$  на скорость и характеристики профиля травления арсенида галлия.

## Методика эксперимента

Были проведены процессы плазмохимического травления GaAs в плазме  $C_2F_5Cl$  с различными рабочими параметрами. Варьировались поток фреона ( $f$ ), давление в реакторе ( $p$ ), ёмкостная мощность ( $RF_p$ ), индуктивная мощность ( $ICP_p$ ) и время цикла. Травление проводилось в импульсном режиме (время бездействия системы 40 с) на установке Oxford Plasmalab80 (Oxford Instruments, Великобритания) с источником индуктивно-связанной плазмы частотой 13.56 МГц. Для предотвращения перегрева образца, он размещался с помощью вакуумной смазки на сапфировой подложке, к которой снизу потоком 30 см<sup>3</sup>/мин подавался газообразный гелий.

Рисунок на поверхности GaAs был сформирован методом взрывной фотолитографии в сочетании с нанесением двухслойной металлической маски V/Ni (по 75 нм каждый слой) электронно-лучевым напылением на установке Amod 206 (Angstrom Engineering, Канада).

Скорость травления ( $r$ ) и параметры поверхности арсенида галлия (шероховатость  $S_q$ , наличие дефектов), а также полученный профиль исследовались методами интерферометрии белого света (оптическая измерительная система Talysurf CCI 2000, Taylor & Hobson, Великобритания) и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп EVO 10, Carl Zeiss, Германия).

## Результаты и обсуждение

При величине  $f = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$  и малого значения мощности ёмкостного разряда (10 Вт) скорость травления составляет порядка 6 нм/мин. При этом образец GaAs на участке площадью  $100 \text{ мкм}^2$  характеризуется однородной гладкой поверхностью ( $S_q = 0.7 \text{ нм}$ ). Увеличение потока фреона в 8 раз (до  $80 \text{ см}^3/\text{мин}$ ) не приводит к росту скорости процесса. Очевидно, это связано с особенностью строения молекулы хлорпентафторэтана, в результате диссоциации которой образуются частицы, как принимающие участие в травлении, так и способствующие пассивации поверхности [1].

Увеличение ёмкостной мощности с 10 до 75 Вт приводит к росту  $r$  в 10 раз (до 60 нм/мин) в связи с увеличением концентрации хлорсодержащих частиц и преобладанием процесса травления над пассивацией. При  $RF_p = 150 \text{ Вт}$  скорость травления возрастает еще больше - до 125 нм/мин. Однако при этом на стенке протравленного профиля GaAs появляется слой продуктов пассивации с неравномерными контурами.

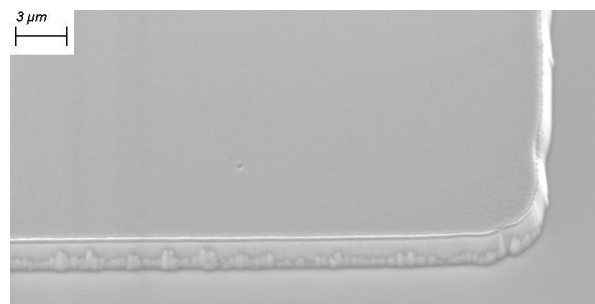
Выключение генератора ICP приводит к уменьшению скорости травления более чем в 2.5 раза. Вместе с этим шероховатость поверхности увеличивается до 1.4 нм, а вокруг протравленных элементов появляются «бортики». Поверхность маски после травления покрыта неоднородностями в виде чешуек неправильной формы. По всей вероятности это следы оставшегося полимера, который не полностью стравился из-за низкой концентрации бомбардирующих ионов в плазме при полном отсутствии индуктивной мощности.

При снижении  $ICP_p$  от 250 до 150 Вт  $r$  уменьшается незначительно (в пределах 10%). На поверхности металлической маски и на дне протравленных элементов практически отсутствуют дефекты, однако этот режим нельзя считать оптимальным в виду наличия полимерного слоя на стенках узких канавок.

Зависимость скорости травления арсенида галлия в плазме  $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$  от давления - нелинейная. Так, при повышении  $p$  с 5 до 11 мТорр  $r$  уменьшается в 1.2 раза; а при 6-кратном увеличении  $p$  (до 30 мТорр), скорость процесса снижается всего в 2.5 раза. Снижение скорости травления с ростом давления можно объяснить уменьшением энергии частиц в виду сокращения их длины свободного пробега. При

низком давлении в процессе травления арсенида галлия на поверхность подложки выпадают единичные крупные неоднородности, которые попадают как на маску, так и на протравленные элементы. При высоких значениях  $p$  поверхность травления GaAs остается гладкой, однако, по контуру элементов образуются «бортики», похожие на те, что наблюдались ранее при выключении генератора ICP.

При сокращении времени цикла в 2 раза (с 30 до 15 с), скорость травления незначительно уменьшается (примерно на 11%), при этом общее время процесса увеличивается существенно. Гораздо большее влияние на характер процесса оказывает проведение травления в непрерывном режиме. В первую очередь это касается ухудшения степени анизотропии. Так, для канавки шириной 9 мкм, степень анизотропии составляет 3:1, что меньше в 2 раза по сравнению с величиной анизотропии травления для канавки идентичного размера, полученной в импульсном режиме. Следует отметить, что в непрерывном режиме наблюдается осаждение полимера на боковых стенках профиля травления (Рисунок).



**Рис.** Изображение с электронного микроскопа боковой стенки профиля травления GaAs в индуктивно-связанной плазме  $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ .  $RF_p = 150 \text{ Вт}$ ,  $ICP_p = 250 \text{ Вт}$ ,  $p = 11 \text{ мТорр}$ ,  $f = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$

Работа поддержана стипендией Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-2056.2021.3. Плазмохимическое травление и анализ полученного профиля арсенида галлия выполнены на оборудовании ЦКП ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур».

## Литература

1. А.И. Охапкин, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов, С.А. Краев, Е.В. Скороходов, В.И. Шашкин. // ФТП, Т. 52, В. 11, С. 1362-1365 (2018).

# Двухэлектронные переходы на оборванной связи кремния

Т.В. Павлова\*, В.М. Шевлюга

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991.

\*pavlova@kapella.gpi.ru

Оборванная связь кремния имеет локализованные состояния, на которых могут находиться ноль, один или два электрона ( $DB^+$ ,  $DB^0$  и  $DB^-$ , соответственно), и уровни таких состояний расположены в запрещенной зоне. В настоящей работе для контролируемого заполнения данных уровней на поверхности  $Si(100)-2\times 1-Br$  использован сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Задавая напряжение на зонде СТМ, мы изменяли изгиб зон и таким образом управляли положением уровней оборванной связи относительно уровня Ферми. Если уровень Ферми оказывался выше незаполненного уровня  $DB^+$  и ниже заполненного уровня  $DB^-$ , возникала неравновесная ситуация и мы наблюдали непрерывное переключение состояний оборванной связи между  $DB^+$  и  $DB^-$ . Из экспериментальных данных следует, что состояние  $DB^0$  не участвует в таких переходах, следовательно происходят только двухэлектронные переходы, характерные для  $U^-$  центров. Мы объяснили двухэлектронные переходы искривлением зон зарядом  $DB$ .

## Введение

Оборванная связь кремния ( $DB$ ) образуется на поверхности  $Si(100)-2\times 1$ , покрытой галогеном ( $Hal=Cl, Br$ ), при отсутствии одного атома  $Hal$ . Оборванная связь содержит один неспаренный электрон, при этом атом  $Si$  нейтрален ( $DB^0$ ). Если дополнительный электрон присоединяется к  $DB$ , атом  $Si$  становится отрицательно заряженным ( $DB^-$ ), а если электрон уходит с  $DB$ , атом  $Si$  становится положительно заряженным ( $DB^+$ ). Энергетические уровни  $DB^0$ ,  $DB^-$  и  $DB^+$  находятся в запрещенной зоне кремния, и их заполнение можно изменять в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ). Управление уровнями  $DB$  в СТМ осуществляется за счет эффекта искривления зон иглой (tip induced band bending, TIBB). Так, отрицательное напряжение на игле СТМ (положительное на образце) приводит к искривлению зон вверх, и заполненные уровни  $DB^0$  и  $DB^-$  при определенном напряжении могут оказаться выше уровня Ферми, что будет способствовать опустошению  $DB$ . Уровни трех зарядовых состояний  $DB$  расположены в запрещенной зоне кремния в следующей последовательности (отсчитывая от дна запрещенной зоны вверх): заполненный уровень  $DB^0$ , дважды незаполненный уровень  $DB^+$ , дважды заполненный уровень  $DB^-$  и незаполненный уровень  $DB^0$ . Таким образом, нейтральное состояние  $DB$  стабильно когда уровень Ферми находится между заполненным и незаполненным уровнями  $DB^0$ , в то время как отрицательное (положительное) состояние  $DB$  стабильно когда уровень Ферми находится выше (ниже) уровня  $DB^-$  ( $DB^+$ ). Следовательно, если уро-

вень Ферми находится между уровнями  $DB^-$  и  $DB^+$  (выше уровня  $DB^-$  и ниже уровня  $DB^+$ ) стабильно только нейтральное состояние. Однако, при постепенном изменении напряжения в СТМ, переход от  $DB^+$  к  $DB^-$  происходит не через нейтральное, а через какое-то другое состояние [1,2]. В работах [1,2] было показано, что в переходной области происходит быстрое переключение между состояниями  $DB^+$  и  $DB^-$  (возможно с участием  $DB^0$  [1]). Причиной быстрого переключения считается равенство скорости заполнения и скорости опустошения  $DB$ , при этом состояние  $DB^+$  реализуется когда скорость опустошения превышает скорость заполнения, а  $DB^-$  – наоборот.

В настоящей работе мы предлагаем альтернативное объяснение данного эффекта: переключения  $DB^+$  в  $DB^-$  без перехода в  $DB^0$ , и представляем дополнительные экспериментальные данные.

## Методика эксперимента и расчета

В экспериментах использовались акцепторные ( $B$ ,  $1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) и донорные ( $P$ ,  $0.1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) образцы  $Si(100)$ . Очистка образцов и создание монослоя из галогенов выполнялись согласно работе [3]. Манипуляции на поверхности  $Si(100)-2\times 1-Cl$  ( $-Br$ ) проводились в LT-STM GPI CRYO (SigmaScan Ltd.) при температуре  $77\text{ K}$  и давлении  $10^{-11}\text{ Торр}$ .

Спин-поляризованные вычисления выполнены на основе теории функционала плотности (DFT), реализованной в программном пакете VASP [4]. Поверхность  $Si(100)-2\times 1-Cl$  ( $-Br$ ) моделировалась периодически повторяющимися ячейками  $6\times 6$ , состо-



ящими из шестнадцати атомных слоев кремния, нижние три из которых были зафиксированы.

## Результаты и обсуждение

Переключение зарядовых состояний DB в СТМ проводилось путем изменения напряжения на образце при сканировании поверхности, что приводило к изменению положения уровней DB относительно уровня Ферми и, как следствие, к изменению заряда DB. В процессе сканирования туннельный ток поддерживался постоянным (1 нА). Идентификация трех зарядовых состояний DB проводилась с использованием DFT-расчетов. Сканирование при достаточно высоком положительном напряжении (4 В) приводило к удалению электрона с DB, т.е. к  $DB^+$ . При уменьшении напряжения (примерно до 2 В) DB оказывалась отрицательно заряженной. В промежуточной области напряжений (2 – 3 В) СТМ-изображение DB не соответствовало изображению от  $DB^0$ , а имело особенности одновременно двух зарядовых состояний,  $DB^+$  и  $DB^-$ .

В промежуточной области напряжений, когда на СТМ-изображении DB наблюдались особенности одновременно двух зарядовых состояний, очень редко DB переходила в нейтральное состояние,  $DB^0$ . После этого DB переставала изменять зарядовое состояние при изменении напряжения. Данный факт однозначно указывает на то, что в промежуточной области напряжений переходы между состояниями  $DB^+$  и  $DB^-$  происходят без участия  $DB^0$ .

В предыдущих работах [1,2] при наблюдении данного эффекта переключения состояний DB на поверхности Si(100)-2×1-H, переход от  $DB^+$  к  $DB^-$  объяснялся конкуренцией между скоростью заполнения и очищения DB. Однако, наше новое наблюдение о прекращении переходов после спонтанной разрядки DB (перехода в нейтральное состояние  $DB^0$ ) невозможно объяснить конкуренцией скоростей.

Мы считаем, что учет искривления зон зарядом на DB (эффект CIBB, charge induced band bending) может приводить к переключению зарядового состояния между от  $DB^+$  к  $DB^-$  без перехода в  $DB^0$ . Если DB находится в состоянии  $DB^+$ , то положительный заряд вызывает локальное искривление зон вниз. В промежуточной области напряжений уровень  $DB^-$  находится выше уровня Ферми, а  $DB^+$  – ниже, поэтому они оба термодинамически нестабильны. За

счет искривления зон вниз зарядом на  $DB^+$ , уровень  $DB^-$  может оказаться ниже уровня Ферми и стать выгодным, что вызовет переход из  $DB^+$  в  $DB^-$ . Однако, отрицательный заряд  $DB^-$  вызывает локальное искривление зон вверх, так что уровень  $DB^+$  может оказаться выше уровня Ферми и стать выгодным, что вызовет обратный переход из  $DB^-$  в  $DB^+$ . При спонтанном переходе в  $DB^0$  эффект CIBB пропадает, и переключение прекращается. Согласно оценке из DFT-расчетов, расстояние между уровнями  $DB^+$  и  $DB^-$  составляет около 0.2 эВ, поэтому если эффект CIBB оказывается более 0.1 эВ, он может приводить к таким переходам.

В заключение, мы контролируем изменяли заряд DB с положительного на отрицательный в СТМ, и объяснили быстрые переходы между состояниями в промежуточной области эффектом CIBB. Возникающие двухэлектронные переходы характерны для дефектов с отрицательной корреляционной энергией (U), хотя оборванная связь кремния является дефектом с положительной корреляционной энергией. Поведение оборванной связи как  $U^-$  дефекта мы объясняем искривлением зон зарядом на оборванной связи, которое приводит к тому, что каждый раз после переключения заряда состояние с противоположным знаком оказывается более выгодным. Оборванная связь может использоваться как квантовая точка, поэтому понимание процесса переключения между зарядовыми состояниями крайне важно.

## Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ (грант 20-02-00783). Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН).

## Литература

1. M. Taucer, L. Livadaru, P.G. Piva *et al.* // Phys. Rev. Lett., V. 112, 256801 (2014).
2. H. Labidi, M. Taucer, M. Rashidi *et al.* // New J. Phys., V.17, 073023 (2015).
3. T.V. Pavlova, V.M. Shevlyuga, B.V. Andryushechkin, K.N. Eltsov // Phys. Rev. B, V. 101, 235410 (2020).
4. G. Kresse, J. Hafner // Phys. Rev. B, V. 47, 558 (1993).

# Проводимость монокристаллических пленок алмаза, легированного бором

С.К. Папроцкий<sup>1, §</sup>, И.В. Алтухов<sup>1</sup>, М.С. Каган<sup>1</sup>, Н.А. Хвальковский<sup>1</sup>, С.Е. Дижур<sup>1</sup>,  
Н.Б. Родионов<sup>2</sup>, А.П. Большаков<sup>3</sup>, В.Г. Ральченко<sup>3</sup>, Р.А. Хмельницкий<sup>4</sup>

1 Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Моховая 11-7, Москва, 125009.

2 Троицкий Институт инновационных и термоядерных исследований, ул. Пушкиновых, вл. 12, Москва, г. Троицк, 10884.

3 Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991.

4 Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Ленинский пр., 53, Москва, 119991.

§ s.paprotskiy@gmail.com

Изучена проводимость пленок монокристаллического алмаза, легированного бором, в электрических полях до  $5 \times 10^5$  В/см в интервале температур 74 - 580 К. Определены концентрации свободных дырок и примесей, степень компенсации. Обнаружено, что примеси сильно компенсированы, степень компенсации составляла  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  при концентрации примесей  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Предложено объяснение такой автокомпенсации. Выяснены механизмы ионизации акцепторных примесей бора сильным электрическим полем при различных температурах.

Бор – основная акцепторная примесь в алмазе, которая сравнительно легко вводится в большой концентрации. В отличие от Ge и Si, где бор – мелкий акцептор, в алмазе его энергия ионизации  $\sim 370$  мэВ, что сильно затрудняет практическое использование алмаза, так как даже при комнатной температуре его проводимость мала. Проводимость можно увеличить за счет ионизации примеси бора сильным электрическим полем. Процессы ионизации в алмазе интересны не только для приложений, но и для изучения их отличия от аналогичных процессов в Ge и Si. В настоящей работе исследовалась проводимость пленок монокристаллического алмаза, легированного бором, в электрических полях до  $5 \times 10^5$  В/см в интервале температур 74°–580 К.

## Образцы и методика измерений

Исследовались эпитаксиальные алмазные пленки толщиной 10-12 мкм, выращенные методом газофазного химического осаждения (CVD) на подложках из кристаллов алмаза с ориентацией (100), сильно легированных бором ( $\sim 2 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>). Подложки получены методом высокого давления/высокой температуры (HPHT). CVD синтез алмазных пленок проводили в плазме смеси метана и водорода, созданной излучением магнетрона с частотой 2,45 ГГц. Омические контакты из сплава Ni-W толщиной  $\sim 35$  нм наносили методом магнетронного напыления. Вольтамперные характеристики (ВАХ) измерялись либо на постоянном напряжении (в линейной области ВАХ), либо на треугольных импульсах с временем нарастания 0.5-100 мкс и частотой повторения 1 -

100 Гц (во избежание джоулева нагрева при больших токах). В последнем случае ВАХ восстанавливали из зависимостей напряжения и тока от времени.

## Результаты и обсуждение

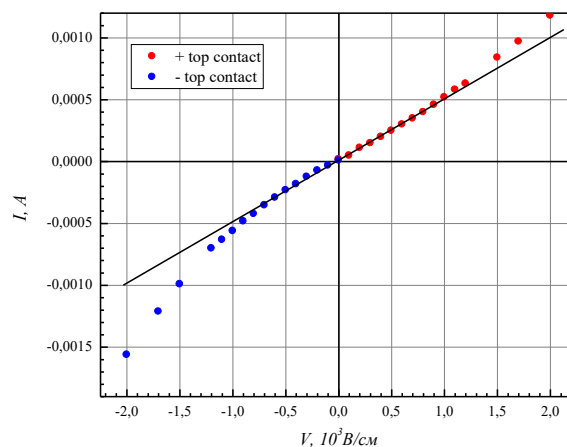
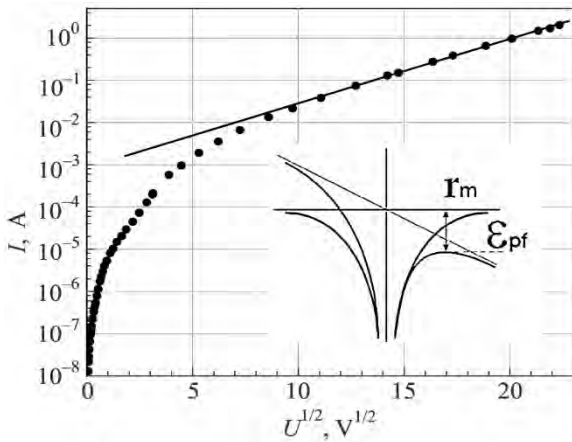


Рис. 1. ВАХ алмаза с бором. T=300 К

На рис. 1 приведена ВАХ алмазной пленки, линейность и симметричность которой демонстрирует омичность контактов при малых напряжениях. Начиная с полей  $\sim 1$  кВ/см наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения, которую мы связываем с линейной полевой зависимостью сечения захвата дырок на притягивающие ионы бора. Экспериментально такая зависимость наблюдалась, например, при захвате дырок на ионы бора в кремнии [1]. При полях выше  $\sim 30$  кВ/см наблюдается экспоненциальный рост тока, вызванный ионизацией бора. Мы связываем ионизацию примеси с уве-

личением термоэлектронной эмиссии за счет эффекта Френкеля-Пула – понижения потенциала примеси в электрическом поле (вставка на рис. 2). Зависимость концентрации носителей  $p$  от электрического поля  $E$  даётся формулой Френкеля [2]  $p \sim \exp[(e^3 E/\epsilon)^{1/2}/kT]$ , где  $e$  - элементарный заряд,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура.

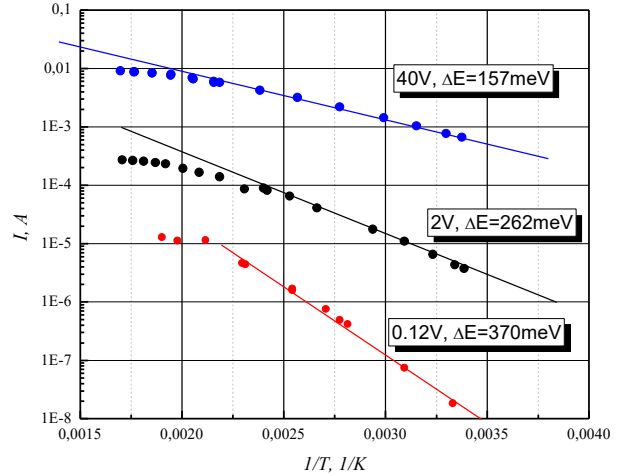


**Рис. 2.** ВАХ алмаза, легированного бором, демонстрирующая ионизацию по эффекту Френкеля-Пула. На вставке - схема эффекта.  $\epsilon_{pf}$  - понижение примесного барьера по Френкелю,  $r_m$  - положение максимума потенциала

На рис. 2 приведена ВАХ образца алмаза в координатах  $\log j - E^{1/2}$  при комнатной температуре. Линейная аппроксимация зависимости  $\log j (E^{1/2})$  при  $E > 30$  кВ/см подтверждает сделанный вывод. При этих полях дрейфовая скорость дырок  $v_s$  должна насыщаться и плотность тока  $j = ev_s$  пропорциональна концентрации свободных дырок.

На рис. 3 приведены температурные зависимости проводимости алмаза с бором в разных полях. При температурах выше комнатной проводимость  $\sigma$  пропорциональна  $\exp(\Delta\epsilon/kT)$ . При малых напряжениях, в области линейности ВАХ, энергия активации составляет  $\Delta\epsilon \sim 0,37$  эВ, что соответствует энергии ионизации бора. С ростом напряжения энергия активации уменьшается из-за понижения примесного барьера и  $\Delta\epsilon = \epsilon_i - \epsilon_{FP}$ , где  $\epsilon_i$  - энергия ионизации бора. При высоких температурах зависимость  $\sigma(T)$  насыщается из-за истощения примеси за счет термической ионизации. В области истощения концентрация свободных дырок равна разности концентраций акцепторов  $N_A$  и компенсирующих доноров  $N_D$ . Используя значения подвижности дырок из литературы (см., напр., [3]), получаем  $p \sim 10^9$  см<sup>-3</sup>. Та же ве-

личина получается из проводимости в линейной части ВАХ. Это позволяет определить степень компенсации  $(N_A - N_D)/N_D$ , которая оказалась порядка  $10^{-5}$ , т.е. акцепторы практически полностью компенсированы донорами.



**Рис. 3.** Температурные зависимости тока для разных напряжений

Такая автокомпенсация может возникать при CVD росте алмазных пленок. Примеси входят в растущий кристалл из газовой смеси СВЧ разряда, в которую атомы бора попадают за счет испарения из сильно легированной подложки, а донорная примесь - это азот из остаточного воздуха. Известно, что диффузия радикалов по поверхности является существенной стадией роста алмаза. При этом вероятность встраивания азота в решётку крайне мала. Азот может стабилизироваться на поверхности только в виде пар В-N в результате рекомбинации радикалов бора и азота. Фактически это нейтральная "квази-молекула" нитрида бора. Такой комплекс уже неподвижен. Он зарастёт в процессе эпитаксии, что и приведет к автокомпенсации.

Работа выполнена в рамках госзадания при частичной поддержке РФФИ (грант 18-02-01079).

### Литература

1. Э.Э. Годик, Ю.А. Курицын, В.П. Синис. ФТП, Т. 12, 351, 1978.
2. J. Frenkel, On Pre-Breakdown Phenomena in Insulators and Electronic Semi-Conductors, Phys. Rev. 1938, V. 54, 647.
3. J. Pernot, P.N. Volpe, F. Omnès, and P. Muret, Phys. Rev. B 81, 205203 (2010).

# Экспериментальное исследование люминесцентных свойств двумерных фотонных кристаллов с упорядоченными нанопостройками Ge(Si) при различных подходах к упорядочению

А.В. Перетокин<sup>1, 2, \*</sup>, М.В. Степихова<sup>1, §</sup>, А.В. Новиков<sup>1, 2</sup>, Ж.В. Смагина<sup>3</sup>, С.А. Дьяков<sup>4</sup>

1 Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский р-он, Нижегородская обл., Россия 603087.

2 ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д.27, Нижний Новгород.

3 Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

4 Сколковский институт науки и технологий, ул. Нобеля, 3, Москва, 143005.

\*aperetokin@ipmras.ru, §mst@ipmras.ru

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований двумерных фотонных кристаллов (ФК) с квадратной и гексагональной решёткой отверстий, сформированных на кремниевых структурах с упорядоченными нанопостройками Ge(Si). В данных ФК используются два подхода к упорядочению нанопостройков. Обсуждаются явления усиления сигнала ФЛ нанопостройков в таких структурах за счёт их взаимодействия с модами фотонного кристалла. Экспериментально получена зонная структура ФК с квадратной решёткой отверстий и выявлены моды, вносящие основной вклад в усиление сигнала ФЛ.

## Введение

Для решения проблемы создания источников излучения ближнего ИК-диапазона на кремнии интерес представляют структуры с самоформирующимися нанопостройками Ge(Si). Для увеличения сигнала микро-ФЛ используются двумерные фотонные кристаллы (ФК), сформированные на таких структурах. Как будет показано в данной работе, рост интенсивности сигнала ФЛ происходит за счёт взаимодействия нанопостройков с модами ФК. Большого усиления сигнала ФЛ можно ожидать при прецизионном встраивании нанопостройков в максимумы поля мод ФК [1]. Рассмотрены особенности взаимодействия излучения упорядоченных нанопостройков Ge(Si) с модами ФК при двух различных подходах к упорядочению нанопостройков.

## Образцы и методы исследований

Исследовались двумерные фотонные кристаллы с упорядоченными нанопостройками Ge(Si) с квадратной и гексагональной решёткой отверстий. Рассмотрены два образца с различным подходом к упорядочению нанопостройков: одностадийным и двухстадийным. Образец «А» получен при двухстадийном подходе, где изначально происходит упорядочение нанопостройков Ge(Si) в квадратную решётку с периодом 1-4 мкм. При этом для упоря-

дочения используются затравочные ямки малого размера, для которых зарождение нанопостройков происходит внутри ямки [2]. Впоследствии, в структуре с упорядоченными нанопостройками Ge(Si) формируется ФК с гексагональной решёткой отверстий с периодом 525-600 нм и радиусом отверстий 73-89 нм. При одностадийном подходе используются большие отверстия для упорядочения нанопостройков Ge(Si), которые одновременно формируют ФК [3]. При этом зарождение нанопостройков происходит вокруг отверстий (образец «В»). Для данного образца были сформированы ФК с квадратной и гексагональной решёткой отверстий. Период решётки варьировался от 0.5 до 2 мкм. Исследованные структуры выращивались на подложках «кремний на изоляторе» (подложки SOI) и содержали 5 (образец «В») или 10 (образец «А») слоев нанопостройков Ge(Si). Общая толщина структур над слоем окисла составляла 290 нм (образец «А») и 255 нм (образец «В»).

Излучающие свойства полученных структур анализировались методами спектроскопии микро-ФЛ с использованием двух методик: стандартной методики измерений микро-ФЛ и методики измерений микро-ФЛ в геометрии диаграммы направленности. Последняя методика позволяет проводить анализ углового распределения излучения исследуемых фотонно-кристаллических структур [4].

Теоретический анализ выполнялся Фурье-модальным методом в формализме матрицы рассеяния [5].

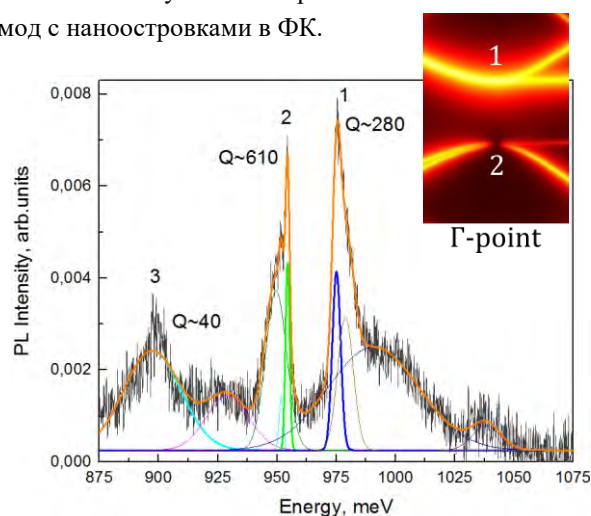
## Результаты и обсуждение

Наибольший рост сигнала можно наблюдать при спектральном совпадении максимума излучения наностроек и наиболее интенсивной моды ФК.

При двухстадийном подходе формирование и упорядочение наностроек не связано с параметрами ФК, что позволяет более точно подобрать параметры ФК для наблюдения максимального усиления сигнала ФЛ. Так, для образца «А» наблюдалось усиление сигнала в 23 раза, в сравнении с областью образца, где формирования ФК и упорядочения наностроек не проводилось.

При одностадийном подходе зарождение наностроек и формирование ФК происходит одновременно, т.е. параметры ФК в конечном итоге влияют на упорядочение и формирование наностроек Ge(Si), поэтому успешное формирование ФК с упорядоченными вокруг отверстий наностройками Ge(Si) происходит лишь для определённого и достаточно узкого диапазона периодов. Так, для квадратной решётки это 0.7-0.9 мкм при радиусе отверстий ~70 нм, для гексагональной – около 1 мкм, при таком же радиусе отверстий. Для квадратной решётки усиление сигнала в максимуме в 10 раз наблюдалось для ФК с периодом решетки 0.7 мкм и радиусом отверстий 70 нм, для гексагональной – в 13 раз для ФК с периодом 1 мкм. Результаты исследований показывают, что при малых периодах формирования наностроек в структуре не происходит в силу недостаточного количества Ge, локализуемого между отверстиями, тогда как при больших периодах наблюдается разрастание островков и зарастивание отверстий, формирующих ФК. Малый радиус отверстий приводит к тому, что область излучения наностроек попадает в энергетический диапазон мод ФК высокого порядка, которые слабо интенсивны, и, перекрываясь друг с другом, формируют широкий пик в спектре ФЛ. Для выявления мод, вносящих основной вклад в усиление сигнала ФЛ, были проведены исследования зонной структуры ФК. Для проведения таких измерений был выбран ФК с квадратной решёткой с периодом 0.8 мкм и радиусом отверстий 70 нм (образец «В»). Полученные результаты и данные теоретических расчетов показали, что в уси-

ление сигнала ФЛ вносят вклад радиационные моды и моды связанных состояний в континууме (ВКС). Наблюдаемые моды имеют разные дисперсионные характеристики и особенности в  $\Gamma$ -М и  $\Gamma$ -Х направлениях зоны Бриллюэна. Так, моды ВКС выделяются высокой добротностью и наличием разрыва в  $\Gamma$ -точке зоны Бриллюэна [4], что подтверждается экспериментально и теоретически (рисунок 1). Данные теоретических расчетов показывают взаимосвязь между интенсивностью наблюдаемых мод в спектре ФЛ и пространственной корреляцией распределения максимумов электромагнитного поля этих мод с наностройками в ФК.



**Рис. 1.** Спектр фотолюминесценции ФК с квадратной решёткой с периодом 800 нм и радиусом отверстий 70 нм. На вставке приведены результаты численного моделирования зонной структуры данного ФК в окрестностях  $\Gamma$ -точки. Цифрами отмечены: 1, 3 – радиационные моды, 2 – мода ВКС

Работа поддержана РФФИ (проект #21-72-20184).

## Литература

1. R. Jannesari, M. Schatzl, F. Hackl *et al.* // *Opt. Express*, V. 22, 25426 (2014).
2. Ж.В. Смагина, В.А. Зиновьев, Г.К. Кривякин *и др.* // *ФТП*, Т. 52, 1028 (2018).
3. A.V. Novikov, Zh.V. Smagina, M.V. Stepikhova *et al.* // *Nanomaterials*, V. 11, 909 (2021).
4. S.A. Dyakov, M.V. Stepikhova, A.A. Bogdanov *et al.* // *Laser Photonics Rev.*, V. 15, 2000242 (2021).
5. S.G. Tikhodeev, A.L. Yablonskii, E.A. Muljarov *et al.* // *Phys. Rev. B*, V. 66, 045102 (2002).

# Изменение механизма резистивного переключения в структуре на основе оксида гафния

О.О. Пермякова<sup>1, 2, \*</sup>, А.Е. Рогожин<sup>1</sup>, А.В. Мяконьких<sup>1</sup>, К.В. Руденко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технологический институт имени К.А. Валиева РАН, Нахимовский проспект, 34 корп. 1, Москва, 117218.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (ГУ), Институтский переулок, 9, Долгопрудный, 141701.

\*o.permyakova@phystech.edu

Экспериментально изучен переход биполярного типа резистивного переключения к комплементарному типу резистивного переключения в структуре Pt/HfO<sub>2</sub>/HfO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/TiN. Переход от биполярного резистивного переключения к комплементарному типу резистивного переключения наблюдался при приложении напряжения выше напряжения переключения в низкоомное состояние. Этот переход сопровождается образованием барьера Шоттки на границе с электродом.

## Введение

Очень высокая плотность мемристоров была достигнута за счет кроссбар массива. Такие массивы мемристоров могут быть использованы в качестве резистивной памяти с произвольным доступом (RRAM). RRAM может быть использована для одновременной обработки и хранения информации, а также для нейроморфных вычислений [1].

Основным недостатком кроссбар архитектуры является проблема утечек тока через соседние элементы кроссбар массива. Эта проблема возникает, когда высокоомное состояние элемента массива ошибочно считывается как низкоомное. Эта проблема может быть решена за счет формирования встроенного селектора (транзистор, диод) [2]. Но формирование встроенного селектора усложняет процесс формирования массива. Вместо селектора возможно использовать мемристор с нелинейными вольтамперными характеристиками (ВАХ). Например, прибор обладающим комплементарным резистивным переключением (КРП), в котором низкоомное и высокоомное состояния не различимы до напряжения выше порогового. При использовании схемы половинного смещения для считывания состояния возможно использование мемристора с КРП без использования селектора.

В этой работе будет показана возможность работы прибора Pt/HfO<sub>2</sub>/HfO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/TiN в комплементарном режиме переключения.

## Методика эксперимента

Для исследования приборов с общим нижним электродом была сформирована структура

HfO<sub>2</sub>/HfO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/TiN методом плазма-стимулированного атомно-слоевого осаждения [3]. Верхние электроды (Pt) были сформированы через теньевую маску методом магнетронного распыления. Площадь верхнего электрода составляла 0,0360±0.0015 мм<sup>2</sup> (рис. 1а).

Измерение ВАХ проводилось с помощью параметрического анализатора Keithley-4200 и модулей SMU. Для того чтобы избежать избыточного отклика тока во время электроформовки в измерительную цепь был последовательно подключен резистор [4]. Напряжение прикладывалось к верхнему электроду, а общий нижний электрод был заземлен.

## Метод расчета

Высота барьеров Шоттки ( $\phi_B$ ) определялась с помощью уравнения эмиссии Шоттки [5]:

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/4\pi\epsilon_i d_{ox}})}{kT}\right) \quad (\Phi 1)$$

где  $A$  — постоянная Ричардсона,  $d_{ox}$  — толщина активного слоя прибора. При построении ВАХ в осях  $\ln(J/T^2)$  и  $\sqrt{V}$  область с проводимостью Шоттки является линейной. При этом из наклона этой прямой  $q/kT \cdot \sqrt{q/4\pi\epsilon_i d_{ox}}$  можно определить значение диэлектрической проницаемости активной области, а из значения пересечения прямой с осью ординат  $\ln(A) - q\phi_B/kT$  можно определить значение высоты барьера Шоттки. Значение  $\phi_B$  можно определить из наклона значений  $\ln(A) - q\phi_B/kT$  в зависимости от  $1/kT$  при различных значениях температуры окружающей среды.



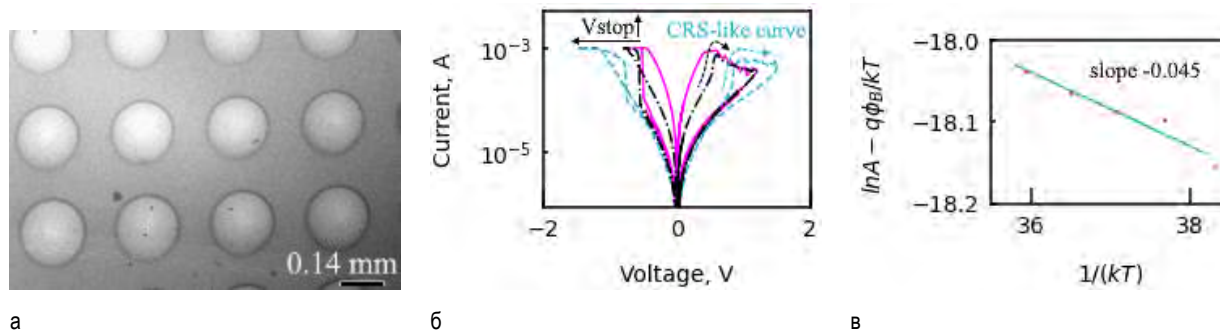
## Результаты и обсуждение

Типичные ВАХ исследуемого прибора представлены на рисунке 1б. Для прибора характерно наличие нескольких типов резистивного переключения (биполярное и комплементарное) при одинаковом значении ограничении тока 1 мА. При изменении значения тока ограничения прибор может иметь только один тип резистивного переключения [6]. Биполярное резистивное переключение (сплошная линия) возможно при напряжении переключения в низкоомное состояние  $-0,8$  В и при напряжении переключения в высокоомное состояние  $1,3$  В. При подаче на прибор напряжения больше, чем напряжение переключения в низкоомное состояние происходит переход к комплементарному резистивному переключению (пунктирная линия). Комплементарное резистивное переключение возможно в диапазоне напряжений от  $-1,5$  В до  $1,5$  В.

Увеличивая значение отрицательного напряжения остановки возможно уменьшать отношение сопротивлений до кривой комплементарного резистивного переключения.

Переход от одного типа переключения к другому может происходить за счет изменения формы филамента внутри активной области мемристора [7].

Для комплементарного резистивного переключения в стеке  $\text{HfO}_2/\text{HfO}_x\text{N}_y/\text{TiN}$  в низкоомном состоянии, проводимость до кривой комплементарного резистивного переключения ограничена барьером Шоттки, высота которого составляет  $0,045$  эВ (рис.1в). Для определения высоты барьера Шоттки ВАХ характерные низкоомному состоянию были измерены в диапазоне температур от  $30^\circ\text{C}$  до  $50^\circ\text{C}$ . Низкоомное состояние рассматривалось для ВАХ резистивного переключения подобных ВАХ указанных пунктирной (голубой) линией на рисунке 1б.



**Рис. 1.** (а) — снимок верхнего электрода с интерференционного микроскопа; (б) — ВАХ резистивного переключения приборов  $\text{HfO}_2/\text{HfO}_x\text{N}_y/\text{TiN}$  для разных отрицательных напряжений остановки, биполярное резистивное переключение обозначено сплошной линией, комплементарное резистивное переключение обозначено пунктирной и штрих-пунктирной линией; (в) — определение высоты барьера Шоттки

## Литература

1. Yesheng Li, Kah-Wee Ang // *Adv. Intell. Syst.*, V. 3, 2000137 (2020).
2. Lingyun Shi, Guohao Zheng, Bobo Tian *et al.* // *Nanoscale Adv.*, V. 2, 1811-1827 (2020).
3. Chang Liu, Chun-Chen Zhang, Yan-Qiang Cao *et al.* // *J. Mater. Chem. C*, V. 8, 12478-12484 (2020).
4. Yi Meng Lu, Mohammad Noman, Wenhao Chen *et al.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, V. 45, 395101 (2012).
5. С. Зи, Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ — М.: Энергия, 1973.
6. Junhyeok Choi, Sungjun Kim // *Coatings*, V. 10, 765 (2020).
7. Writam Banerjee, Wu Fa Cai, Xiaolong Zhao *et al.* // *Nanoscale*, V. 9, 18908-18917 (2017).

# Поперечный термомагнитный эффект в планарных полупроводниковых сверхрешетках без центра инверсии

А.А. Перов\*, П.В. Пикунов

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603950.

\*wkb@inbox.ru

В одноэлектронном приближении во внешнем магнитном поле при наличии градиента температуры аналитически и численно рассчитана поверхностная плотность тока носителей заряда в двумерных двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках *n*-типа без центра инверсии. Магнитное поле полагалось постоянным однородным, приложенным перпендикулярно плоскости электронного газа. В результате совместного решения уравнения Шредингера и кинетического уравнения Больцмана показано, что зависимости поверхностной плотности поперечного тока от температуры и модуля градиента температуры имеют существенно нелинейный характер. В отсутствие центра инверсии электростатического поля сверхрешетки законы дисперсии электрона в магнитных блоховских подзонах не являются четными функциями проекций квазиимпульса в магнитной зоне Бриллюэна. Как следствие, многократно возрастает величина поверхностной плотности поперечного термомагнитного тока по сравнению со случаем centrosymmetricного потенциала поля сверхрешетки.

## Введение

Известно, что магнитное поле квантует поперечное движение заряженной частицы, а поле кристаллической решетки приводит к образованию энергетических зон. В результате в зонах проводимости и в валентной зоне полупроводников в магнитном поле формируются «лестницы» уровней Ландау. В действительности, как показывают результаты первых теоретических работ, выполненных в середине прошлого столетия [1,2], уровни Ландау в кристаллах уширяются в зоны экспоненциально малой ширины. Причиной тому является снятие вырождения состояний в магнитном поле по центру орбиты вследствие взаимодействия заряженной частицы с электростатическим периодическим полем кристалла.

Предметом нашего исследования является двумерный электронный газ в области полупроводникового гетероперехода с поверхностной двоякопериодической сверхрешеткой с периодом  $a$ , помещенный в постоянное однородное перпендикулярное магнитное поле. На рис.1 представлена типичная схема такой структуры. В присутствии градиента температуры в плоскости гетероперехода в направлении, перпендикулярном магнитному полю и  $\vec{\nabla}T$  возникает поверхностный термомагнитный ток.

## Теоретическая модель и метод расчета

Гамильтониан, описывающий квантовомеханическое движение электрона в рассматриваемой системе, имеет вид  $\hat{H} = \hat{H}_0 + V(x, y)\hat{E}$ ,

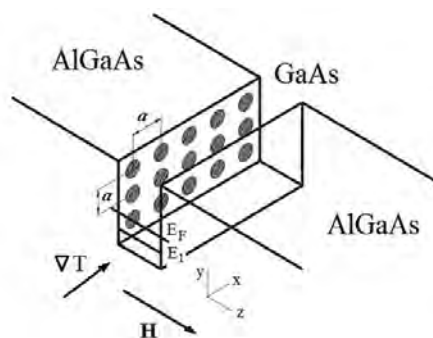


Рис. 1. Модель гетероперехода с поверхностной сверхрешеткой

где  $\hat{H}_0$  – гамильтониан электрона в постоянном однородном магнитном поле,  $\hat{E}$  – единичный оператор. Рассмотрены модели как centrosymmetricного  $V(x, y) = V_0(\cos 2\pi x/a + \cos 2\pi y/a)$ , так и неcentrosymmetricного потенциала электростатического поля сверхрешетки  $V(x, y) = V_1(\cos 2\pi x/a + \cos 2\pi y/a) + V_2(\sin 2\pi x/a + \sin 2\pi y/a)$ . Предполагается заполненным низший уровень размерного квантования  $E_1$  в области гетероперехода. Магнитное поле таково, что реализуется случай рационального значения числа квантов магнитного потока через элементарную ячейку сверхрешетки  $\Phi/\Phi_0 = eHa^2/2\pi\hbar c = p/q = 3/1$ . Эффективная масса  $m^*$  электрона в GaAs взята равной  $0.067 m_e$ , период решетки  $a = 50$  нм.

Уровень Ферми таков, что заполнена низшая магнитная подзона Ландау. Это соответствует концентрациям носителей порядка  $n = 10^{11} \text{см}^{-2}$ .

Расчетам поверхностной плотности термомагнитного поперечного тока (в  $y$  – направлении)

$$j_y = (2e/h^3) \int v_y f(\vec{p}) dp_x dp_y \quad (2)$$

в нижней магнитной подзоне Ландау предшествовало численное решение однородного кинетического уравнения Больцмана в релаксационном приближении ( $\tau > 2\pi\hbar/kT$ ). Зависимость времени релаксации от квазиимпульса электрона учтена нами феноменологически через закон дисперсии двумерных носителей  $\varepsilon(\mathbf{p})$  в рамках наиболее подходящей модели, развитой в работе [3]:  $\tau(\mathbf{p}) \sim (kT)^\beta \varepsilon(\mathbf{p})^{\alpha+0.5}$ . Расчеты поперечного тока были проведены для случаев рассеяния электрона на нейтральных примесях ( $\alpha = 0, \beta = 0$ ) и акустических фононах ( $\alpha = -0.5, \beta = -1$ ). Градиент температуры выбран в модели не зависящим от каких-либо параметров системы:  $(\nabla T)_x = \zeta$ .

На рис.2,3 представлены результаты расчетов  $y$ -проекции поверхностной плотности тока в изучаемой модельной структуре в зависимости от величины градиента температуры при различных отношениях  $\gamma = V_2/V_1$ ,  $V_1 = 1$  мэВ. Начальный линейный рост функции  $j_y(\zeta)$  (рассчитано аналитически) сменяется участком ее убывания, плотность термомагнитного тока имеет максимум. По мере возрастания величины градиента температуры функция распределения меняется таким образом, что вклад в (2) от состояний носителей с положительной проекцией скорости в подзоне Ландау возрастает. Это приводит к увеличению значения  $j_y(\zeta)$ . При дальнейшем возрастании модуля градиента функция распределения носителей по импульсам "стремится" равновелико учесть вклад в ток от состояний как с положительной, так и отрицательной  $y$ -проекцией скорости. Имеет место участок с отрицательной дифференциальной проводимостью. Кроме того, возрастает вклад в ток от состояний носителей с отрицательной эффективной массой в магнитной подзоне. С увеличением отношения  $\gamma$  величина термомагнитного тока возрастает при фиксированном значении модуля градиента температуры. Это связано с нарушением четности закона дисперсии носителей в магнитном поле и, как следствие, дополнительным нетривиальным вкладом в

поперечную скорость. При указанных значениях отношения  $\gamma$  имеет место трехкратное усиление эффекта Нернста-Эттинсгаузена на максимуме термомагнитного тока.

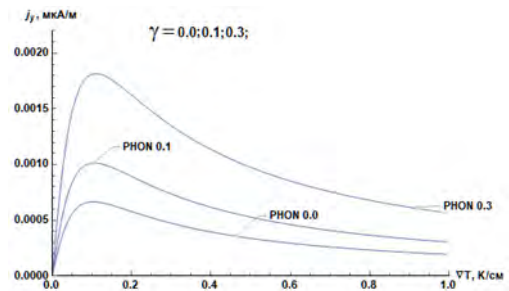


Рис. 2. Зависимость  $y$ -проекции поверхностной плотности тока от величины градиента температуры при  $T=2$  К при рассеянии на фононах

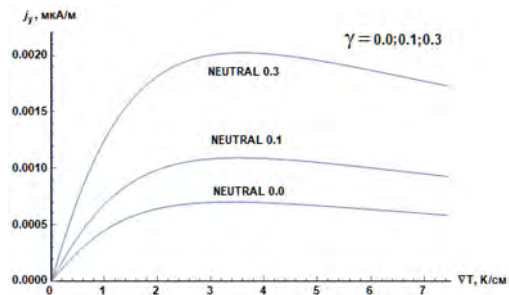


Рис. 3. Зависимость  $y$ -проекции поверхностной плотности тока от величины градиента температуры при  $T=2$  К при рассеянии на нейтральных атомах примеси

Поскольку при рассеянии на нейтральных примесях время релаксации не зависит от температуры в рассматриваемой модели, максимум термомагнитного тока реализуется в области больших значений модуля градиента температуры.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания № 0729-2020-0058.

## Литература

1. P.G. Harper // Proc. Phys. Soc., M. 68, 874 (1955).
2. F.A. Butler, E. Brown // Phys. Rev. B 166, 630 (1968).
3. С.И. Борисенко // ФТП 33(10), 1240 (1999).

# Анализ и расчет металлодиэлектрических зеркал для квантовых каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона

К.А. Подгаецкий\*, Ю.Ю. Козлов, А.В. Лобинцов, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», ул. Введенского, д.3, корп.1, г. Москва, 117342.

\*podgaetskykonstantin@yandex.ru

Проведен анализ и расчет металлодиэлектрических зеркал для квантовых каскадных лазеров среднего ИК диапазона. Подобраны оптимальные материалы диэлектриков для минимизации поглощения излучения и металлических покрытий для достижения высокого коэффициента отражения. Определены физические толщины слоев, входящих в состав многослойного покрытия.

## Введение

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) являются перспективными источниками света в спектральных диапазонах первого и второго окна прозрачности атмосферы. Для многих практических применений актуально стоит задача повышения выходной оптической мощности таких излучателей. Проверенным методом повышения оптической мощности полупроводниковых лазеров является использование зеркальных покрытий, нанесённых на одну из граней лазерного резонатора. Однако, для ККЛ, излучающих в среднем ИК-диапазоне, создание указанных покрытий осложняется выбором материалов, имеющих низкое поглощение в рассматриваемом спектральном диапазоне. Очевидный вариант использования диэлектрических зеркал для ККЛ осложняется значительной толщиной последних, что усложняет технологию их получения. Данного недостатка лишены металлодиэлектрические зеркала, анализ которых выполнен в данной работе, применительно к использованию в ККЛ.

## Обоснование выбора материалов

Расчет многослойной зеркальной системы проводился методом рекуррентных матриц. Пример матрицы  $j$ -го слоя представлен ниже:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j & \frac{i}{n_j} \sin \varphi_j \\ i \cdot n_j \cdot \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{bmatrix} \quad (\Phi 1)$$

Общая матрица многослойного покрытия имеет вид:

$$\sum_{i=1}^j M_i = M_j \cdot M_{j-1} \cdot \dots \cdot M_1 \quad (\Phi 2)$$

Далее определялись параметры пропускания, отражения и поглощения системы [1].

Для минимизации значения энергетического коэффициента поглощения многослойной зеркальной системы необходимо подобрать такие материалы, которые имеют минимальное значение коэффициента поглощения на расчетной длине волны. Для первого окна прозрачности расчет проведен для  $\lambda = 4.5$  мкм, а для второго окна прозрачности – для  $\lambda = 8.0$  мкм.

Подбор проводился из следующих вариантов материалов: Si, SiO<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnSe.

Значения оптических констант для SiO<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> брались из [2], для Si из [3], для Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> из [4] и для ZnSe из [5].

Зависимости энергетического значения поглощения от толщины слоя материалов для разных длин волн представлены на рис. 1 и 2.

Первичный анализ констант показал, что использование материалов Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnSe в первом окне прозрачности атмосферы не целесообразно в виду наличия большого поглощения. Из расчета для второго окна прозрачности атмосферы по той же причине были исключены Si, SiO<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub>.

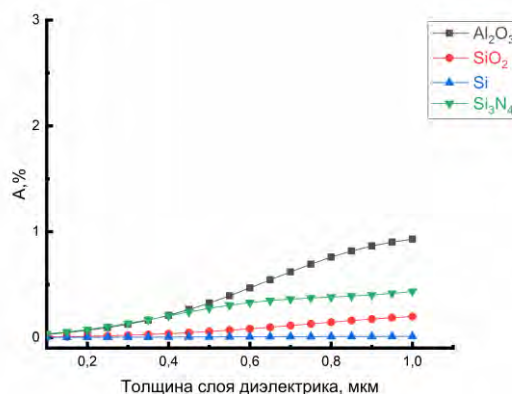
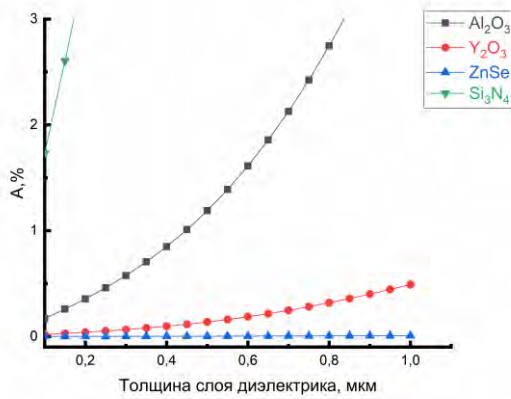


Рис. 1. Зависимость энергетического значения поглощения от толщины слоя материала на длине волны 4.5 мкм



**Рис. 2.** Зависимость энергетического значения поглощения от толщины слоя материала на длине волны 8.0 мкм

### Результаты расчета

**Таблица 1.** Результаты численных расчетов предложенных конфигураций многослойных зеркальных покрытий

Материал диэлектрика	Оптические константы диэлектрика		Энергетические коэффициенты		
	n	k	R, %	A, %	T, % ×10 <sup>4</sup>
<b>Длина волны излучения 4.5 мкм</b>					
Al2O3	1.5464	0.0027	98.5	1.5	5.784
SiO2	1.3726	0.0005	98.5	1.5	5.58
Si3N4	2.3662	0.0021	98.5	1.5	7.291
<b>Длина волны излучения 8 мкм</b>					
Al2O3	1.2861	0.0346	99	0.9935	9.155
Y2O3	1.6686	0.003	99	0.9935	9.45
ZnSe	2.4060	0.0005	99	0.9936	10.27

После определения параметров диэлектрических слоев были рассчитаны металлodieлектрические зеркала. Структурно, дизайн многослойного металлodieлектрического покрытия состоял из прилегающего к грани диэлектрического слоя, который служил непроводящим буфером, слоем Ti для

улучшения адгезии последующего слоя Au к диэлектрическому слою. Для длины волны 4.5 мкм зеркальные покрытия рассчитывались так, чтобы энергетический коэффициент отражения составлял не менее 98.5%, а для длины волны 8.0 мкм – не меньше 99%. Результаты численных расчетов многослойных зеркальных покрытий выбранных конфигураций для длин волн 4.5 и 8.0 мкм представлены в табл. 1.

### Выводы

Таким образом, проведен анализ диэлектрических материалов и представлены результаты расчета металлodieлектрических зеркал для ККЛ среднего ИК-диапазона. Показано, что выбранные конфигурации многослойного покрытий позволяют добиться высокого значения энергетического коэффициента отражения зеркал для спектрального диапазона 4°–5 мкм 98.5 % и для 8°–10 мкм 99 % при минимальных значениях (для металлodieлектрических зеркал) энергетического коэффициента поглощения (для 4°–5 мкм 1.5 % и для 8°–10 мкм 1 %).

### Литература

1. M. Bai, S. R. Darvish, N. Bandyopadhyay *et al.* // J. Appl. Phys, V. 109, 053103 (2011).
2. J. Kischkat, S. Peters, M. Semtsiv *et al.* // Applied Optics, V. 51, 6789°–6798 (2012).
3. E. Shkondin, O. Takayama, M. E. Aryaee Panah *et al.* // Optical materials express, V. 7, 1606–1627 (2017).
4. D. F. Bezuidenhout, R. Pretorius. // Thin solid films, V. 139, 121°–132 (1985).
5. H. Qi, X. Zhang, Q. Wang *et al.* // Optical constants of zinc selenide in visible and infrared spectral ranges. J. Appl. Spectros, V. 84, 679–682 (2017).

# Динамика скольжения волны зарядовой плотности в условиях синхронизации ВЧ-СВЧ полями

В.Я. Покровский, С.А. Никонов, С.Г. Зыбцев

ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Моховая 11-7, Москва, 125009.

\*vadim.pokrovskiy@mail.ru

Динамика движения волны зарядовой плотности (ВЗП) в условиях синхронизации ВЧ полем экспериментально изучена на микроскопических масштабах времён. Показано, что осцилляции порогового поля,  $E_t$ , и величин ступенек Шапиро (СШ) периодичны по перемещению ВЗП за полупериод ВЧ поля и имеют одну и ту же природу. Продемонстрировано, что, используя ВЧ-СВЧ поля, можно моделировать образцы с заданными свойствами ВЗП и величиной  $E_t$ . Данный подход позволил описать систему СШ при смещении ВЧ полей на двух частотах.

## Введение

Синхронизация волны зарядовой плотности (ВЗП), скользящей в электрическом поле выше порогового ( $E > E_t$ ), электрическим полем ВЧ или СВЧ диапазона – одно из замечательных явлений, наблюдаемых в квазиодномерных проводниках [1]. В режиме синхронизации частота преодоления барьеров потенциала пиннинга,  $f_t = \langle v \rangle / \lambda$ , где  $\lambda$  – период потенциала, задаётся внешним переменным полем,  $V_{ac}$ , то есть, совпадает с частотой поля  $f$  или одной из его гармоник или субгармоник. При этом средняя скорость ВЗП  $\langle v \rangle$  не изменяется в некотором диапазоне постоянных напряжений  $V_{dc}$ . Дифференциальное сопротивление ВЗП возрастает, при полной синхронизации – до бесконечности, и на ВАХ появляются т.н. ступеньки Шапиро (СШ). На зависимостях дифференциальной проводимости  $\sigma_d$  от  $V_{dc}$  СШ проявляются как узкие провалы.

Интуитивно может показаться, что для возникновения СШ достаточно малых значений  $V_{ac}$ : и без ВЧ поля ВЗП движется с периодически меняющейся скоростью, и нужно лишь незначительное дополнительное воздействие, чтобы ВЗП не «сбивалась с ритма». Однако эксперимент показал, что для возникновения СШ величина  $V_{ac}$  должна быть  $\geq V_{dc}$ . В [2] показано, что для возникновения заметных СШ необходимо, чтобы ВЗП на какое-то время останавливалась, то есть мгновенное значение поля в какие-то моменты должно быть ниже  $E_t$ . С дальнейшим ростом  $V_{ac}$  величины СШ достигают максимума, а затем спадают.

При достаточной когерентности ВЗП можно наблюдать многократные осцилляции величин СШ, квазипериодические по  $V_{ac}$  [1].

Другая особенность образцов с ВЗП, наблюдаемая при воздействии ВЧ поля, – удивительное сходство ВАХ в области  $E \lesssim E_t$  с участками ВАХ в областях СШ. В частности, наблюдаются осцилляции  $E_t$ , подобные осцилляциям СШ. Участок ВАХ при  $E \lesssim E_t$  иногда называют 0-й СШ, однако анализа этого сходства до последнего времени не проводилось.

Важным шагом в понимании природы СШ и осцилляций их величин стал анализ перемещения ВЗП при одновременном воздействии  $V_{dc}$  и  $V_{ac}$  на микроскопическом масштабе времён,  $t < 1/f$  [3]. Идея анализа весьма проста: практически во всех случаях  $1/f$  превосходит характерные времена отклика ВЗП, и, значит, её скорость в каждый момент времени определяется мгновенным значением напряжения  $V$ . Скорость при данном  $V$  можно определить, измерив ВАХ без ВЧ поля и пересчитав нелинейный ток в  $f_t$ . Таким образом, для расчёта  $v(t)$  необходимо только точно знать значения  $V_{dc}$  и  $V_{ac}$ , а дальше – дело техники: численно интегрируя  $v(t)$  можно найти перемещение ВЗП, скажем, за каждый полупериод ВЧ поля.

Наиболее детальный анализ осцилляций СШ [3] был проведён на вискерах  $NbS_3$ , в которых ВЗП существует при комнатной температуре, и может обладать исключительно высокой когерентностью скольжения. Универсальный характер полученных результатов был подтверждён аналогичным анализом СШ в образцах  $NbSe_3$  и  $TaS_3$ .

Показано, что осцилляции величин СШ строго периодичны по перемещению ВЗП за каждый полупериод ВЧ поля. При этом обнаружено, что 0-я СШ достигает 1-го минимума, когда за каждый полупериод ВЧ поля ( $V_{dc}=0$ ) ВЗП смещается на  $\pm \lambda$ .



Этот результат имеет очевидное объяснение: минимум  $E_t$  наблюдается, когда ВЗП раскачивается до краёв долины, в которой она исходно находится. Сколь угодно малое постоянное поле перебросит её в соседнюю долину, и начнётся движение ВЗП. Второй минимум 0-й СШ наблюдается при смещении ВЗП на  $\pm 2\lambda$ , третий – на  $\pm 3\lambda$ , и т.д., что объясняется аналогично.

Анализ первой СШ показал, что её 1-й минимум наблюдается при смещении ВЗП на  $\delta x_1 = 2\lambda$  за 1-й полупериод (когда  $V_{dc}$  и  $V_{ac}$  одного знака) и на  $-\lambda$  – за 2-й. Тут очевидна аналогия с 0-й СШ: минимум наблюдается также, когда точки возврата попадают на максимумы потенциала пиннинга. Этот результат, как и анализ других минимумов 1-й СШ, доказывает, что 1-ю СШ, как и 0-ю, можно рассматривать как колебания ВЗП в периодическом потенциале. Аналогичный вывод сделан для других СШ (рис. 1).

Предложенное рассмотрение динамики ВЗП оказалось применимым и для решения обратной задачи. Имея в распоряжении ВАХ какого-либо образца и зная коэффициент пересчёта тока ВЗП в  $f_t$ , можно предсказать вид ВАХ при заданном значении  $V_{ac}$ : удалось рассчитать, при каких значениях  $V_{dc}$  наблюдаются СШ, и при каких значениях  $V_{ac}$  величины СШ достигают минимумов и максимумов [4].

Итак, «настоящие» СШ отличаются от нулевой только тем, что колебания ВЗП в потенциале пиннинга асимметричны. Это отличие устраняется переходом в подвижную систему отсчёта, связанную с ВЗП. При этом возникает вопрос: а нельзя ли использовать ВАХ в окрестности СШ для имитации образцов, в которых выход из режима синхронизации рассматривается как депиннинг ВЗП? Если это так, можно искусственно регулировать величину  $E_t$  (уменьшая вплоть до нуля) и получать исключительно высокую когерентность скольжения ВЗП.

Предлагаемый подход оказался полезным при рассмотрении СШ, возникающих на ВАХ при воздействии ВЧ облучения на двух частотах,  $F$  и  $f$ , одновременно, в условиях  $F \gg f$  [5]. Установлено, что СШ, определяемые частотой  $F$ , можно рассматривать как «основные», вокруг которых возникают «спутники», определяемые частотой  $f$ . Положение «спутников» можно найти, перейдя в подвижную систему отсчёта, движущуюся со скоростью  $\lambda F$ . Более того, в этой системе отсчёта осцилляции величин спутников также оказываются периодиче-

скими по перемещению ВЗП за каждый полупериод ВЧ поля частотой  $f$ . Удалось также наблюдать осцилляции спутников, являющихся гармониками и субгармониками  $f$ . Интересно, что субгармоники возникают вокруг «основной» субгармоники, т.е. СШ, соответствующей частоте  $F/2$ .

Отметим ещё важное с практической точки зрения следствие предложенного рассмотрения СШ. Часто непосредственное измерение  $V_{ac}$  затруднено из-за сложности согласования ВЧ (СВЧ) напряжения с высокоомным образцом. Однако если при каком-то значении  $V_{ac}$  наблюдается, скажем, минимум  $E_t$ , мы можем вычислить точное значение  $V_{ac}$  на образце. Так, этот подход был нами использован в [5] для калибровки напряжения на образце.

Авторы благодарят проекты РФФИ 20-02-00827 и 20-32-90231 за поддержку.

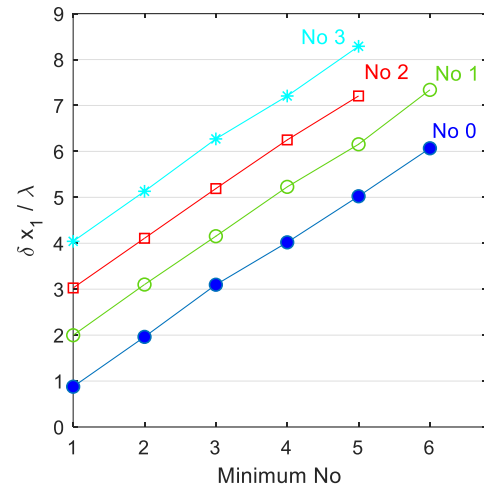


Рис. 1. Зависимости перемещения ВЗП за первый полупериод ВЧ поля,  $\delta x_1/\lambda$ , от № минимума СШ для 0-й, 1-й, 2-й и 3-й СШ [3]

## Литература

1. S. Brown and A. Zettl // in *Charge Density Waves in Solids*, edited by L. P. Gor'kov and G. Grüner (Elsevier), V. 25, 223 (1989).
2. S. E. Brown, G. Grüner, and L. Mihály // *Solid State Commun.* V. 57, 165 (1986).
3. S.G. Zybtshev *et al.* // *Phys. Rev. B* V. 101, 115425 (2020).
4. S.A. Nikonov *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 118, 213106 (2021).
5. S.A. Nikonov *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* V. 118, 253108 (2021).

# Усиление терагерцового излучения в экранированном графене на резонансах Фано с учетом пространственной дисперсии

О.В. Полищук<sup>1\*</sup>, Д.В. Фатеев<sup>1,2</sup>, В.В. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019.

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет, ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012.

\*polischuk.sfire@mail.ru

В данной работе рассматривается спектр поглощения / усиления терагерцового излучения в графене с дрейфом носителей заряда, экранированном сверху периодической металлической решеткой (внешняя терагерцовая волна падает на металлическую решетку), отделенной от графена тонким диэлектрическим слоем. Снизу слой графена экранирован сплошным металлическим экраном, расположенном на некотором расстоянии от графена. Спектры поглощения / усиления терагерцового излучения в графене со смещенным уровнем Ферми рассчитаны с использованием самосогласованного электродинамического подхода и гидродинамического описания электронной жидкости в зависимости от величины расстояния от графена до металлического экрана.

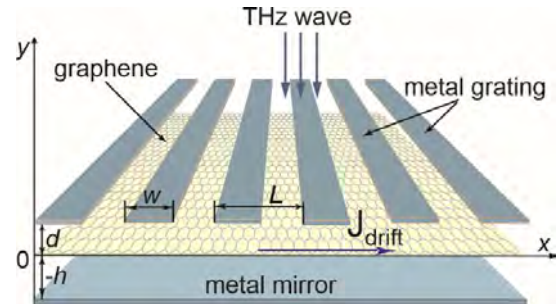
## Введение

Графен является природным материалом с нулевой запрещенной зоной и чрезвычайно высокой подвижностью носителей заряда, а возможность электрически управлять свойствами носителей заряда в графене делает его перспективным для терагерцовых (ТГц) и оптоэлектронных применений, например, как среды усиления для ТГц лазеров [1], которые могут работать при комнатной температуре. В нижней части ТГц спектра вместо кинетической модели транспорта электронов в графене может быть использовано гидродинамическое описание электронной жидкости [2]. Это объясняется тем, что частота быстрых межчастичных столкновений составляет величину порядка 5 ТГц и является доминирующей частотой в системе, согласно как экспериментальным данным [3], так и теоретическим оценкам с использованием микроскопической теории [4].

## Теоретическая модель

В данной работе рассматривается спектр поглощения / усиления терагерцового излучения в графене с дрейфом носителей заряда, экранированном сверху (по ходу внешней падающей волны) периодической металлической решеткой, отделенной от графена тонким диэлектрическим слоем толщиной  $d$ . Снизу слой графена экранирован сплошным металлическим экраном, расположенном на расстоянии  $h$  от графена (см рис. 1). Спектры поглощения / усиления ТГц излучения в графене со смещенным уровнем Ферми  $E_F$  рассчитаны с использованием самосо-

гласованного электродинамического подхода и гидродинамического описания дираковской жидкости. Отклик структуры учитывается в виде нелокальной комплексной динамической графеновой проводимости  $\sigma_G(\omega, q)$  [5–7], полученной с учетом давления электронной жидкости,



**Рис. 1.** Схематическое изображение нескольких периодов исследуемой структуры и система координат. Постоянный электрический ток течет в графене поперек металлических полосок, вдоль оси  $x$ . Диэлектрическая постоянная окружающей среды  $\epsilon_a = 1$ , диэлектрического барьерного слоя толщиной  $d$  и диэлектрического слоя толщиной  $h$   $\epsilon_{b,s} = 11.7$

постоянного электрического поля в графене и адиабатического процесса распространения волн:

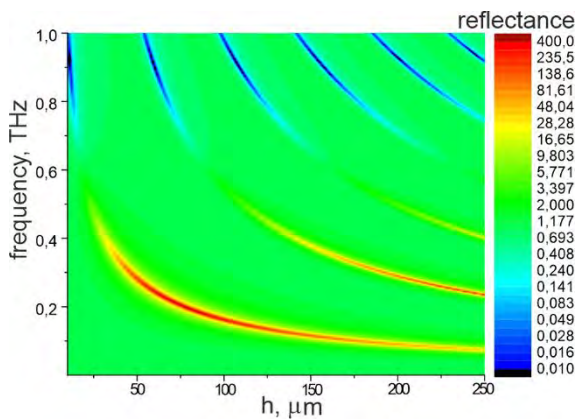
$$\begin{aligned} \sigma_G(\omega, q) = & \\ = & ie^2 n \omega (1 - \beta^2) v_F / E_F \times [(1 - \beta^2)(\omega - qu) - 3\beta^2 i \gamma / 2] / \\ & / \{q^2 v_F^2 / 2 \times qu(1 - 2\beta^2) + \omega^2(\omega + i\gamma)(1 - \beta^2 / 2) + \\ & + q^2 v_F^2 / 2 \times [\beta^2(3i\gamma + 4\omega) - \omega] - \\ & - qu\omega[\beta^2(i\gamma - \omega / 2) + (i\gamma 5 / 2 + 2\omega)]\}, \end{aligned}$$

где  $n = E_F^2 v_F / 4\pi \hbar (1 - \beta^2)^{3/2}$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $q$  – волновой вектор,  $\hbar$  – приведенная постоянная

Планка,  $\beta = u / v_F$ ,  $u$  и  $v_F$  – скорость дрейфа и скорость Ферми носителей заряда в графене.

## Результаты и обсуждение

Численно рассчитаны режимы поглощения / усиления ТГц излучения в зависимости от величины расстояния  $h$  от графена до металлического экрана (рис. 2). Поглощение ТГц излучения вызвано преимущественно внутризонными процессами в графене, описываемыми феноменологической скоростью рассеяния носителей заряда. Усиление ТГц излучения (область значений коэффициента отражения больше единицы) достигается на частотах плазмонных резонансов Фано в исследуемой структуре при скоростях дрейфа носителей заряда меньших скорости плазмонов в графене, что согласуется с недавней экспериментальной работой [8].



**Рис. 2.** Коэффициент отражения от исследуемой структуры в зависимости от частоты падающего ТГц излучения и величины расстояния  $h$  от графена до металлического экрана

Расчеты проводились для графена с феноменологической скоростью рассеяния заряда  $10^{13} \text{ c}^{-1}$ , для величины энергии Ферми равной  $E_F = 75 \text{ мэВ}$ , величины скорости дрейфа электронов  $u = 0.5 v_F$ . Период металлической решетки полагался равным  $L = 4.04 \text{ мкм}$ , ширина металлической полоски  $w = 4 \text{ мкм}$ , толщина диэлектрического слоя между графеном и решеткой  $d = 10 \text{ нм}$ .

При противоположном направлении скорости дрейфа электронов получим полностью симметричное решение.

## Заключение

Показано, что усиление ТГц излучения в графене за счет пропускания постоянного электрического тока может быть увеличено на нескольких порядков величины в присутствии в структуре нижнего металлического экрана вследствие увеличения электромагнитной связи между дрейфующими зарядами в графене и ТГц излучением из-за конструктивной интерференции ТГц волны. Величина затухания/усиления ТГц излучения может варьироваться как за счет изменения скорости рассеяния носителей заряда, так и за счет изменения величины скорости дрейфа носителей заряда в графене. Эффект усиления при скоростях дрейфа меньших скорости плазмонов связан с изменением плотности массы носителей заряда в графене при осцилляциях ТГц электрического поля.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

## Литература

1. V. Ryzhii, M. Ryzhii, T. Otsuji // *J. Appl. Phys.*, V. 101, 083114 (2007).
2. D. Svintsov // *Phys. Rev. B*, V. 97, 121405(R) (2018).
3. R. Krishna Kumar, D. A. Bandurin, F. M. D. Pellegrino, et al. // *Nat. Phys.*, V. 13, 1182 (2017).
4. L. Fritz, J. Schmalian, M. Müller, and S. Sachdev // *Phys. Rev. B*, V. 78, 085416 (2008).
5. L. A. Falkovsky and A. A. Varlamov // *Eur. Phys. J. B*, V. 56, 281 (2007).
6. D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii and T. Otsuji // *Phys. Rev. B*, V. 88, 245444 (2013).
7. I. M. Moiseenko, V. V. Popov and D. V. Fateev // *AIP Conference Proceedings*, 2300, 020089 (2020).
8. Stephane Boubanga-Tombet, Wojciech Knap, Deepika Yadav, Akira Satou, Dmytro B. But, Vyacheslav V. Popov, Ilya V. Gorbenko, Valentin Kachorovskii, and Taiichi Otsuji // *Phys. Rev. X*, V. 10, 031004 (2020).

# Структурные и морфологические трансформации слоистых халькогенидов металлов при сублимации и эпитаксиальном росте

С.А. Пономарев<sup>1, 2, \*</sup>, Д.И. Роголо<sup>1</sup>, Д.В. Щеглов<sup>1</sup>, А.В. Латышев<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, просп. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090.

\*s.ponomarev1@g.nsu.ru

Методом *in situ* отражательной электронной микроскопии были визуализированы процессы сублимации и ван-дер-ваальсовой эпитаксии на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ . При воздействии на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  молекулярного пучка Se (до 0.1 нм/с) и нагреве до  $\sim 400^\circ\text{C}$  наблюдалось восходящее движение атомных ступеней, соответствующее конгруэнтной сублимации  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Была развита методика получения атомарных ступеней высотой 1 нм на гладкой поверхности монокристалла  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ , заключающаяся в нанесении литографических канавок и последующем их разрастании при сублимации: Осаждение Bi (до  $\sim 0,01$  нм/с) на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при постоянном потоке Se (до  $\sim 0,1$  нм/с) меняло направление движения ступеней в сторону нижележащих террас, что соответствовало эпитаксиальному росту  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Осаждение In и Se на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при  $\sim 400^\circ\text{C}$  приводило к эпитаксиальному росту слоистого  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . Данный процесс начинался с зарождения 2D островков и после роста на 3-5 нм продолжался с образованием и ростом 3D островков вблизи выходов на поверхность винтовых дислокаций. Добавление аморфного слоя  $\text{In}_2\text{Se}_3$  способствовало подавлению зарождения 3D островков и продолжению роста по ступенчато-слоевому механизму. *Ex situ* измерения спектра комбинационного рассеяния света выявило набор колебательных мод, соответствующий  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ .

## Введение

С начала XXI века изучение слоистых двумерных материалов является перспективным направлением физики конденсированного состояния. Разнообразие свойств данных материалов, в частности  $\text{In}_2\text{Se}_3$  и  $\text{SnSe}_2$ , позволяет использовать их в различных технологических приложениях [1]. Однако, малоизученность механизмов сублимации и роста слоистых халькогенидов металлов, их структурных и морфологических трансформаций в течение данных процессов является одной из актуальных проблем, препятствующих применению данного класса материалов для приложений полупроводниковой электроники и фотоники [2].

## Эксперимент

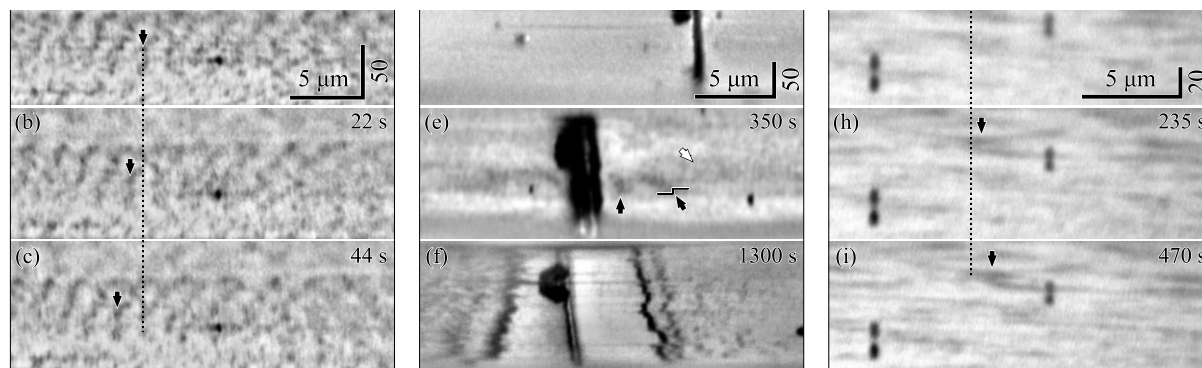
Метод *in situ* отражательной электронной микроскопии (ОЭМ) позволяет наблюдать картины дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), исследовать и контролировать структуру поверхности в процессах эпитаксиального роста и сублимации. В данном методе применялись разделенные испарители Bi/In и Se. Во время эксперимента образцы нагревались путем пропускания электрического

тока. *Ex situ* анализ морфологии поверхности проводился методом атомно-силовой микроскопии (ACM). (AFM, Multimode 8, Bruker).

На этом же оборудовании с помощью алмазного зонда были созданы литографические канавки глубиной 15–30 нм для последующего наблюдения в ОЭМ. Кристаллическая фаза полученных пленок  $\text{In}_2\text{Se}_3$  была определена с помощью *ex situ* измерений комбинационного рассеяния света (КРС) (XploRa Plus, Horiba, лазер 532 нм).

## Результаты и обсуждение

Под воздействием молекулярного пучка Se (скорость осаждения  $\sim 0,1$  нм/с) нагрев подложки  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  до температуры около  $400^\circ\text{C}$  происходит без ухудшения морфологии поверхности. При данной температуре на *in situ* ОЭМ-изображениях видны отдельные ярко-контрастные (0001) террасы, разделенные темноконтрастными атомными ступенями,двигающимися в сторону вышележащих террас, что соответствует сублимации  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  (Рис. 1 (а-с)) и что впервые наблюдалось на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  с помощью *in situ* ОЭМ.



**Рис. 1.** ОЭМ-изображения трансформации поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ : (a–c) восходящее движение атомных ступеней при сублимации со скоростью  $0,022 \text{ nm/s}$ , (d–f) разрастание канавки в процессе отжига, (g–i) нисходящее движение ступеней при росте  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  со скоростью  $3 \times 10^{-4} \text{ nm/s}$ . Черными стрелками отмечены атомные ступени высотой  $1 \text{ nm}$

В данных условиях (скорость осаждения  $\sim 0,1 \text{ nm/s}$  и  $T=400^\circ\text{C}$ ) литографические канавки, нанесенные методом зондовой литографии являются генераторами атомных ступеней, наблюдающихся методом ОЭМ. После сублимации 10 слоев  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  отжиг сформировал атомные ступени и их эшелоны вблизи литографических канавок (Рис 1 (d–f)).

Для исследования ван-дер-Ваальсовой эпитаксии методом *in situ* ОЭМ поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  подвергали воздействию молекулярного пучка Se ( $0,1 \text{ nm/s}$ ) и нагревали до  $\sim 400^\circ\text{C}$ , что приводило к движению атомных ступеней в сторону вышележащих террас. После начала осаждения Bi ( $10^{-2}$ – $10^{-4} \text{ nm/s}$  в разных экспериментах) ступени меняли направление движения и начинали перемещаться в сторону нижележащих террас (Рис. 1 (g–h)). Картины ДБЭО соответствовали послойному росту  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

Для изучения гетероэпитаксиального ван-дер-Ваальсового роста  $\text{In}_2\text{Se}_3$  использовался испаритель In вместо Bi. Когда In, в присутствии молекулярного пучка Se ( $0,1 \text{ nm/s}$ ), осаждался на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ , сублимирующую со скоростью  $\sim 0,0015 \text{ nm/s}$ , рост пленки начинался с зарождения 2D-островков. Картины ДБЭО соответствовали послойному росту  $\text{In}_2\text{Se}_3$  со скоростью  $\sim 0,025 \text{ nm/s}$ . Однако после роста 3–5 нм на ОЭМ изображениях и

картинах ДБЭО наблюдалось зарождение трехмерных островков в областях выхода на поверхность винтовых дислокаций. Добавление аморфного слоя  $\text{In}_2\text{Se}_3$  и его кристаллизации при повышении температуры до ростовой (около  $400^\circ\text{C}$ ) обеспечило поверхность, пригодную для последующего роста без зарождения 3D островков.

Таким образом были впервые визуализированы морфологические преобразования поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  методом *in situ* ОЭМ в процессе сублимации и ван-дер-Ваальсовой эпитаксии. Показано восходящее движение атомных ступеней в процессе конгруэнтной сублимации на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при  $T \sim 400^\circ\text{C}$ . Показано увеличение латеральных размеров и глубины канавок, являющихся источниками атомных ступеней высотой  $1 \text{ nm}$ . Визуализирован ван-дер-Ваальсовый рост  $\text{In}_2\text{Se}_3$  (по данным КРС подтвержден рост  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ ) и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ .

## Литература

1. S. Vishwanath, X. Liu, S. Rouvimov *et al.* // *J. Mater. Res.*, V. 31, 900–910 (2016).
2. M.S. Claro, J.Grzonka, N. Nicoara *et al.* // *Adv. Opt. Mater.*, V. 9, 2001034 (2021).



# Лазерное охлаждение однофотонных источников комбинационным рассеянием света в анти-стоксовском режиме

В.Г. Попов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Центр научных исследований и перспективных разработок, АО «ИнфоТекС», ул. Отрадная, дом 2Б, стр.1, г. Москва, 127273.

<sup>2</sup> Факультет информационных технологий и анализа больших данных, Финансового университета, 4-й Вешняковский пр-д, 4, Москва, 125167.

Vladimir.Popov@infotecs.ru

В докладе предлагается оптическая схема, позволяющая реализовать лазерное анти-стоксовское охлаждение с использованием конфокальной схемы. В частности, предлагается использовать двух лазерную конфокальную схему накачки. При этом частота первого лазера накачки необходима для возбуждения квантовой точки, в то время как частота второго лазера накачки превышает частоту первого, на частоту оптического фона в квантовой точке. Роль второго лазера заключается в вынуждении анти-стоксовского перехода в комбинационном рассеянии.

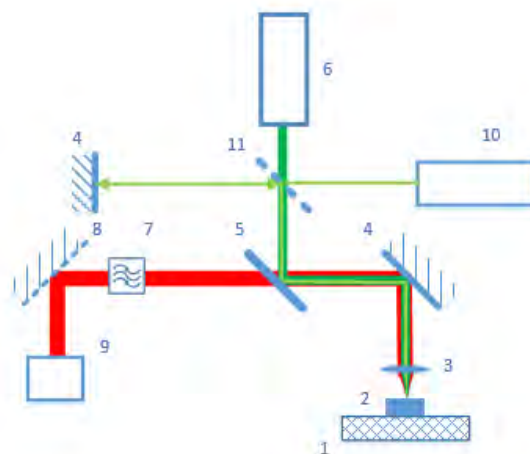
## Введение

Взаимодействие молекул со светом обычно сопровождается комбинационным рассеянием, которое очень часто применяется для исследования этих молекул в рамановских спектрометрах [1]. Стимулированное комбинационное рассеяние света активно используется в волоконно-оптических системах [2], на основе которых созданы рамановские лазеры и усилители [3]. Вынужденное комбинационное рассеяние - это нелинейный эффект, обусловленный стимуляцией стоксова перехода фотонами в волокнах. Примечательно, что такое вынужденное излучение увеличивает вероятность комбинационного рассеяния от величины спонтанного рассеяния от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$ , т. е. на 5 порядков [4]. С одной стороны, такое резкое увеличение вероятности обусловлено большим количеством фотонов в волокне, с другой стороны, следует ожидать когерентного стимулированного излучения и в фоновой подсистеме. Оптические фононы (точнее, поляритоны), в отличие от фотонов, практически неподвижны и сохраняют свои состояния довольно длительное время ( $\sim 2,1$  пс, что можно определить по полуширине стоксовых пиков в спектрах комбинационного рассеяния [5]). Однако рассеяние света может использоваться не только в режиме Стокса, но и в антистоксовом режиме. Недавно лазерное антистоксовое охлаждение было реализовано в твердых монокристаллах [6], коллоидальных квантовых точках [7], кварцевых стеклах, легированных иттербием [8]. В этом докладе мы предлагаем использовать его для источников одиночных фотонов. Однофотонные источники на основе квантовых точек и центров окраски в алмазе

используются с привлечением конфокальных оптических схем микро-фотолюминисценции [9].

## Обсуждение предложений

В докладе предлагается оптическая схема, позволяющая реализовать лазерное анти-стоксовское охлаждение с использованием конфокальной схемы. В частности, предлагается использовать двух лазерную конфокальную схему накачки (см. рис. 1). При



**Рис. 1.** Оптическая схема устройства однофотонного источника состоит из следующих элементов: 1 – подвижный стол (может быть охлаждаемым, например, в криостате); 2 – подложка с квантовыми точками или центрами окраски; 3 – линза; 4 – зеркало; 5 – дихроическое зеркало; 6 – лазер накачки; 7 – фильтр; 8 – зеркало с дифракционной решеткой; 9 – спектрометр; 10 – дополнительный лазер для охлаждения; 11 – полупрозрачная дифракционная решетка



этом частота  $\omega_p$  первого лазера накачки (см. поз. 6 на рис. 1) необходима для возбуждения квантовой точки, в то время как частота второго лазера накачки  $\omega_r$  (см. поз. 10 на рис. 1) превышает частоту первого, на частоту оптического фонона в квантовой точке  $\omega_0$ , т. е.:  $\omega_r = \omega_p + \omega_0$ . Роль второго лазера заключается в вынуждении анти-стоксовского перехода в комбинационном рассеянии, т. е. стимулирование захвата фонона фотоном. В докладе также обсуждается роль влияния такого охлаждения на такие параметры как квантовая эффективность и время жизни в возбужденном состоянии экситонов в полупроводниковых квантовых точках и в центрах окраски алмаза. Вкратце влияние связано не только с температурой, которая в среднем может меняться слабо. А в первую очередь с заселенностью локализованных фононов в квантовых точках и центрах окраски, которые ответственны за эффект «узкого фононного горла» [10]. Эффект «узкого фононного горла» способен резко снизить квантовую эффективность и быстродействие однофотонных источников.

## Литература

1. E. Smith, G. Dent. "Modern Raman spectroscopy – A practical approach". – John Wiley & Sons, LTD (2005).
2. E.J. Woodbury, W.K. Ng, *Proc. I.R.E.* **50**, 2367 (1962).
3. A.J. Stentz, "Applications of Raman lasers and amplifiers in fiber communication systems", *Proc. SPIE* **91**, 3263 (1998).
4. R.W. Boyd, "Nonlinear Optics", 3rd ed. (Academic Press, Boston, 2008), Chap. 10.
5. F.L. Galeener, J.C. Mikkelsen, R.H. Geils, W.J. Mosby, *Appl. Phys. Lett.* **32**, 34 (1978).
6. S. Rostami, A.R. Albrecht, A. Volpi, M. Shaek-Bahae, *Photonics Research* **7**, 445 (2019).
7. Y.P. Rakovich, J.F. Donegan, M.I. Vasilevskiy, A.L. Rogach, *Phys.Status.Solid. A*, **206**, 2497 (2009).
8. M. Peysokhan, S. Rostami, E. Mobini, A.R. Albrecht, S. Kuhn, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Flores, A. Tünnermann, M. Sheik-Bahae, A. Mafi, *ACS Omega* **6**, 8376 (2021).
9. S.D. Trofimov, S.A. Tarelkin, S.V. Bolshedvorskii, V.S. Bormashov, S.Yu. Troshchiev, A.V. Golovanov, N.V. Luparev, D.D. Prikhodko, K.N. Boldyrev, S.A. Terentiev, A.V. Akimov, N.I. Kargin, N.S. Kukin, A.S. Gusev, A.A. Shemukhin, Y.V. Balakshin, S.G. Buga, V.D. Blank, *Opt. Mater. Express*. **10**, 198 (2020).
10. X. Zhang, A.L. Gutierrez-Aitken, D. Klotzkin, P. Bhattacharya, C. Caneau, R. Bhat. *Electronics Letters*, **32**, 1715 (1996).

# Моделирование поведения субмикронных полупроводниковых структур после стабилизации кластера радиационных дефектов

А.А. Потехин<sup>1</sup>, А.С. Пузанов<sup>1,2</sup>, Е.А. Тарасова<sup>2</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», ул. Тропинина, д. 47, Нижний Новгород, 603137.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603022.

\*potehinf@gmail.ru

Предложена модель переноса носителей заряда, учет дефектообразования в которой проведен через добавление связанного заряда на глубокие уровни, созданные частицами высоких энергий. Теоретически показано, что предложенный подход позволяет корректно учесть неоднородное повреждение полупроводника в субмикронных структурах. Предложен метод формирования распределения связанного заряда после стабилизации дефектов на основе данных моделирования TRIM.

## Введение

Взаимодействие корпускулярного и фотонного ионизирующих излучений с веществом носит стохастический характер, что обуславливает усиление неоднородности дефектообразования при уменьшении размеров полупроводниковых структур для заданного уровня воздействия. В результате, погрешность результатов расчетов физико-топологических моделей, основанных на однородном изменении электрофизических параметров полупроводника (подвижности, коэффициенте диффузии, времени жизни носителей заряда) при радиационном воздействии, растет. В предельном случае, когда размеры структуры становятся меньше характерных размеров области разупорядочения (10...50 нм для кремния и арсенида галлия) по крайней мере по одному из направлений, даже один кластер радиационных дефектов способен перекрыть канал полевого или базу биполярного транзисторов [1].

## Математическая модель

В качестве основной модели для реализации задачи учета связанного заряда была выбрана диффузионно-дрейфовая модель, где уравнение Пуассона, представлено в виде:

$$\varepsilon_0 \nabla(\varepsilon \nabla \varphi) + q(N_d - N_a + p - n) = -\rho, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varphi$  – потенциал электрического поля,  $q$  – элементарный заряд,  $N_d$  и  $N_a$  – концентрации доноров и акцепторов,  $n$  и  $p$  – концентрации электронов и дырок,  $\rho$  – плотность связанного заряда глубоких уровней [2]. При

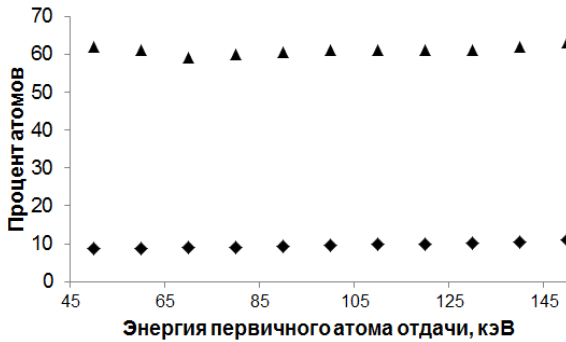
этом, модель является принципиально трехмерной, ввиду необходимости учета локализации заряда в структуре. Связанный заряд рассматривался как совокупность стабилизированных точечных дефектов, образующихся при взаимодействии нейтронов с кристаллической решеткой полупроводниковой структуры. Первичное образование дефектов моделировалось в среде TRIM. Далее, к данным, полученным в среде TRIM, применялся алгоритм пространственной кластеризации с учетом плотности радиационных дефектов [3]. В качестве критериев для алгоритма были выбраны параметры в соответствии с данными работы [4]. Подобный выбор характеристик позволяет выделить дефекты, которые останутся после стабилизации. При решении задачи переноса носителей заряда использовались периодические граничные условия и аппроксимация Шарфеттера-Гуммеля [5]. В качестве численной схемы решения системы уравнений использовалась схема Гуммеля.

## Результаты и обсуждение

Результаты расчетов для формирования связанного заряда из исходных данных, полученных в TRIM, представлены на рисунке 1. Для 100 реализаций областей разупорядочивания, для каждой энергии первичного атома отдачи была построена зависимость числа дефектов, учитываемых в расчете от общего числа дефектов.

Как следует из рисунка, уровень атомов, исключаемых из рассмотрения практически не зависит от энергии первичного атома отдачи. Это обусловлено

особенностями передачи энергии первичного атома отдачи электронной и ионной подсистемам полупроводника в диапазоне энергий 50...150 кэВ [6].



**Рис. 1.** Зависимость отношения числа дефектов, исключаемых из рассмотрения, к общему числу дефектов для различных энергий атомов отдачи для Si (▲) и GaAs (◆), выраженная в процентах

При моделировании полупроводниковых диодных структур основной особенностью являлись значительные расхождения в результатах моделирования вольтамперной характеристики в зависимости от конфигурации дефектов, образовавшихся в структуре. В таблице 1 приведен разброс результатов моделирования в зависимости от характерного размера структуры. Моделирование проводилось для наиболее распространенных топологических норм, используемых в современных радиационно-стойких интегральных микросхемах. В качестве исходных данных для моделирования областей разупорядочивания использовались реализации TRIM с энергией первичного атома отдачи, равной 100 кэВ. Вбрасывание первичного атома отдачи происходило по нормали к поверхности контакта. Дефекты, образовавшиеся за пределами области моделирования транспорта носителей заряда в рассмотрение не включались.

**Таблица 1.** Разброс значений вольтамперных характеристик моделируемой структуры от ее размеров

Размер структуры, нм	90	120	240	350	500
Разброс ВАХ, %	92	63	20	11	0,5

Подобный разброс значений вольтамперных характеристик связан, в первую очередь, с тем, что рабочая область структуры становится сравнима в размерах с областью разупорядочивания, вызванной радиационным воздействием. При увеличении характерных размеров рабочей области конкретная конфигурация распределения заряженных центров перестает влиять на перенос носителей заряда, то есть пространственное распределение радиационных дефектов на макроуровне становится однородным.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057.

## Литература

1. А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов // Физика и техника полупроводников. Т. 53, №12, С.1706 (2016).
2. И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов // Физика и техника полупроводников. Т. 53. № 9. С. 1279 (2019).
3. L.G. Khachiyan // Mathematics of Operations Research. V. 21, № 2. P. 307 (1996).
4. Е.В. Волкова, С.В. Оболенский // Микроэлектроника. Т. 35, № 5. С. 374 (2006).
5. D.L. Scharfetter, H.K. Gummel // IEEE Trans. Electron Devices. V. 16, № 1, P. 64 (1969).
6. А.С. Пузанов, М.М. Венедиктов, С.В. Оболенский и др. // Физика и техника полупроводников. Т. 53, № 9. С. 1250 (2019).

# Исследования спектров фотопроводимости, магнитопротускания и длинноволнового стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe

А.А. Разова<sup>1, 2, \*</sup>, В.В. Румянцев<sup>1, 2</sup>, В.Я. Алешкин<sup>1, 2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>3</sup>, С.А. Дворецкий<sup>3</sup>, С.В. Морозов<sup>1, 2</sup>, М. Orlita<sup>4</sup>

1 Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

2 Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603950.

3 Институт физики полупроводников СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090.

4 LNCMI-EMFL, CNRS UPR3228, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Toulouse, Univ. Toulouse 3, INSA-T, Grenoble and Toulouse, France.

\*annara@ipmras.ru

Совместные исследования и анализ спектров фотопроводимости и магнитопротускания позволяют установить параметры квантовых ям Hg(Cd)Te/CdHgTe и показать, что данные *in situ* эллипсометрического контроля дают заниженное значение концентрации Cd в них. В свою очередь, точное определение состава и толщины квантовых ям Hg(Cd)Te/CdHgTe необходимо для вычисления в активной области величины пороговой энергии безызлучательной оже-рекомбинации, которая определяет максимальную температуру стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe.

## Введение

Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) Hg(Cd)Te/CdHgTe вызывают большой интерес не только из-за возможности реализации топологических изоляторов, но и как материал для межзонных лазеров, работающих в диапазоне 20 – 60 мкм, который не охвачен квантово-каскадными лазерами. В связи с этим возникает задача более детального исследования оптических свойств данных структур, закона дисперсии и рекомбинационных процессов.

Наши исследования сосредоточены на КЯ HgCdTe с квазирелятивистским энергетическим спектром, который, как предполагается, подавляет безызлучательную оже-рекомбинацию. В работе проводятся исследования спектров фотопроводимости (ФП), фотолюминесценции (ФЛ), стимулированного излучения (СИ) и магнитопротускания структур с КЯ на основе HgCdTe для установления точного значения толщины КЯ и Cd в них с целью оптимизации этих и других параметров роста структур, предназначенных для длинноволновой генерации в диапазоне 10 – 22 мкм, направленной на увеличение максимальной температуры, при которой возможно добиться генерации СИ, и дальнейшее «продвижение» его по длине волны.

## Методика эксперимента

Волноводные структуры с массивом КЯ HgCdTe были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs в направлении роста (013) с буферными слоями ZnTe и CdTe.

Измерение спектров ФП проводилось при температурах 4.2 и 77 К с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, где в качестве источника излучения использовался глобар. Образец, излучение на который собирал латунный конус, размещался на конце световодной вставки, погруженной в сосуд Дьюара. Измерение спектров ФЛ и СИ проводилось с использованием того же спектрометра, работающего в режиме пошагового сканирования для подавления фонового шума. В качестве накачки применялись импульсные CO<sub>2</sub>-лазер (10.6 мкм и длительностью импульса ~ 100 нс) и параметрический генератор компании Solar (2 – 2.3 мкм и длительностью импульса ~ 10 нс). Более подробное описание можно найти в [1].

Магнитооптические измерения проводились в магнитных полях до 11 Тл при 4.2 К в лаборатории сильных магнитных полей (Гренобль, Франция). Подробности данных измерений отражено в [2].

## Результаты и обсуждение

На основе анализа спектров ФП (*ex situ* характеристика) и их сравнения с результатами теоретических расчетов, выполненных в рамках модели Берта-Форемана с гамильтонианом Кейна  $8 \times 8$ , были определены значения толщины КЯ ( $d$ ) и концентрации Cd ( $x$ ) в КЯ. Значения приведены в таблице 1. В процессе роста структур проводится *in situ* эллипсометрический контроль состава и толщины слоев. Сравнение *in situ* и *ex situ* характеристик показывает, что значение толщины КЯ, определенное данными методиками, совпадает, а концентрация Cd в КЯ в значительной мере отличается.

Таблица 1. Параметры структур.

Номер структуры	d, нм		x		T <sub>max</sub> , К	E <sub>th</sub> , мэВ
	in situ	ex situ	in situ	ex situ		
1	6.1	6.1	0	0.102	100	19
2	3.65	3.17	0	0	175	42.6
3	7.8	7.8	0	0.08	50	14.7
4	6.8	6.9	0	0.078	80	20.1

На рис. 1 приведена картина магнитопротускания в структуре № 3, где отчетливо видны две линии магнитопоглощения в диапазоне энергий от 70 до 130 мэВ, которые соответствуют наиболее «сильным» межзонным переходам  $\alpha$ - и  $\beta$ . Анализ наблюдаемых особенностей для различных профилей КЯ показывает, что наиболее точное описание получается в предположении о наличии Cd в КЯ (Рис. 1а), в то время как расчеты, произведенные для нулевой концентрации Cd в КЯ (рис. 2б), что соответствует результатам *in situ* характеристики, не позволяют удовлетворительно описать наблюдаемую картину магнитопротускания.

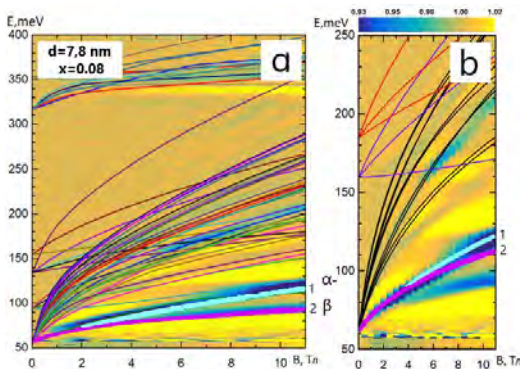


Рис. 1. Спектры магнитопротускания структуры № 3

Таким образом, параметры КЯ, полученные из анализа магнитопротускания, хорошо согласуются с результатами, полученными на основе спектров ФП.

В исследуемых структурах № 1 и № 2 было получено СИ на длине волны около 10 мкм, а в структурах № 3 и № 4 на длине волны около 20 мкм. Температура «гашения» СИ  $T_{max}$ , выше которой не удается наблюдать СИ, для данных структур имеет различное значение (см. табл. 1). Используя уточненные параметры, полученные на основе спектров ФП и магнитопротускания, методом поиска экстремума было найдено значение пороговой энергии безызлучательной оже-рекомбинации  $E_{th}$  с участием двух электронов и дырки. Из таблицы видно, что поведение  $T_{max}$  при фиксированной длине волны СИ коррелирует с поведением  $E_{th}$ , то есть ее увеличение приводит к повышению  $T_{max}$  и наоборот. Обратим внимание, что значения  $E_{th}$  для структур № 1 и № 4 практически совпадают, а температуры «гашения» СИ отличаются на 20 К. Логично предположить, что с увеличением длины волны помимо уменьшения вероятности излучательной рекомбинации происходит рост поглощения на свободных носителях, что в итоге смещает «баланс» между излучательными и безызлучательными процессами в сторону второго. Эти факторы в совокупности с малым энергетическим порогом оже-процесса приводят к тому, что СИ получить не удается.

Максимальная температура, при которой возможно добиться усиления и получить СИ на заданной длине волны, ограничивается величиной пороговой энергии оже-рекомбинации, которая определяется законами дисперсии носителей, зависящими от параметров структур. Совместные исследования спектров фотопроводимости и магнитопротускания позволяют точно установить параметры квантовых ям Hg(Cd)Te/CdHgTe. Точное определение состава и толщины квантовых ям Hg(Cd)Te/CdHgTe необходимо для вычисления величины этой пороговой энергии, которая определяет максимальную температуру стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с КЯ Hg(Cd)Te/CdHgTe.

## Литература

1. V.V. Rumyantsev *et al.* // Semiconductor Science and Technology, V. 28, № 12, 125007 (2013).
2. Bovkun L.S. *et al.* // J. Phys. Condens. Matter, V. 31, 145501 (2019).

Исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования (грант № 075-15-2020-906 "НЦМУ ФОТОНИКА").

# III-V наноструктуры комбинированной размерности на поверхности кремния

Р.Р. Резник<sup>1, 2, \*</sup>, К.П. Котляр<sup>1</sup>, В.О. Грндчин<sup>2</sup>, Е.В. Убийвовк<sup>2</sup>, А.С. Драгунова<sup>1</sup>,  
Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, Н. Акоюн<sup>5</sup>, Г.Э. Цырлин<sup>1-4</sup>

1 СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, ул. Хлопина, 8/3, Санкт-Петербург, 194021.

2 Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 136, Санкт-Петербург, 199034.

3 Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101.

4 Институт Аналитического приборостроения РАН, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А, Санкт-Петербург, 198095.

5 DTU Fotonik, Kongens Lyngby, Denmark, 2800.

\*moment92@mail.ru,

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по синтезу методом молекулярно-пучковой эпитаксии и физических свойств гибридных наноструктур на основе AlGaAs нитевидных нанокристаллов с GaAs и InGaAs квантовыми точками и InP нитевидных нанокристаллов с InAsP квантовыми точками на поверхности кремния. Результаты исследований показали, что выращенные наноструктуры являются перспективными для приложений квантовой телекоммуникации и информатики

## Введение

В настоящее время нитевидные нанокристаллы (ННК) привлекают всё большее внимание исследователей, благодаря возможности реализации на их основе различных приборных компонентов, в том числе солнечных элементов, зондов для сканирующей туннельной микроскопии, лазеров, светодиодов, транзисторов, детекторов, эмиссионных катодов и т. п. [1]. Использование таких технологических методов синтеза ННК как метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2] позволило воспроизводимо получать наноструктуры с комбинированной размерностью, например, типа "квантовая точка (КТ) в ННК" [3]. В отличие от КТ, сформированных по механизму Странски-Крастанова, диаметр, высота и плотность таких КТ определяются диаметром ННК, временем роста и плотностью ННК, соответственно. Благодаря эффективной релаксации механических напряжений на боковых гранях ННК, подобные гибридные наноструктуры могут быть сформированы на поверхности кремния. Ранее было показано, что GaAs КТ в теле AlGaAs ННК, в том числе, выращенных на кремниевой подложке, являются эффективными источниками одиночных фотонов [4], что указывает на перспективность их применения для квантовой криптографии. При этом, как сами AlGaAs ННК, так и GaAs КТ формировались в ранее мало изученной для этой системы вюрцитной кристаллографической фазе [5].

В данной работе приведены результаты экспериментов по МПЭ росту и исследованию физических свойств гибридных наноструктур комбинирован-

ной размерности на основе InP ННК с InAsP КТ, AlGaAs ННК с InGaAs КТ, AlGaAs ННК с GaAs КТ на поверхности кремния. Было показано, что наноструктуры на основе InP ННК с InAsP КТ, демонстрируют спектры фотолуминесценции вплоть до комнатной температуры в широком диапазоне длин волн от 800 до 1400 нм, включая стратегически важную длину волны вблизи 1.3 мкм, что позволяет рассматривать данную систему как перспективную для дальнейшей интеграции оптических элементов на кремниевой платформе с волоконно-оптическими системами. Помимо этого, были проведены исследования направленности излучения из GaAs КТ в теле AlGaAs ННК, выращенных методом МПЭ на поверхности кремния. В результате исследований было показано, что интенсивность излучения из GaAs КТ в теле AlGaAs ННК в направлении роста ННК на 2 порядка превышает интенсивность излучения из КТ в направлении, перпендикулярном росту ННК. Следовательно, AlGaAs ННК с GaAs КТ являются перспективными объектами для использования в качестве наночисточников направленного излучения.

Результаты исследования зависимости физических свойств AlGaAs ННК с GaAs КТ от условий роста показали, что, изменяя время роста КТ, соотношение потоков материалов III группы и температуру роста, можно управлять размером и составом КТ. Возможность синтеза AlGaAs ННК при низких температурах позволяет формировать квантовые точки InGaAs с высоким содержанием индия и приблизиться к телекоммуникационным длинам



волн излучения из КТ, что затруднительно в случае выращивания нанопроволок GaAs. Кроме того, исследования оптических свойств выращенных наноструктур показали наличие узких линий в спектрах фотолюминесценции при 4К. Этот факт косвенно свидетельствует о том, что выращенные наноструктуры могут быть перспективны для создания источников одиночных фотонов. Таким образом, выращенные наноструктуры с управляемыми свойствами перспективны для создания приложений в области квантовой информатики, криптографии и телекоммуникаций.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (РНФ) грант № 21-72-00099.

## Литература

1. В.Г. Дубровский, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов. // ФТП, V. 43, 1585 (2009).
2. G.E. Cirlin, V.G. Dubrovskii, Yu.B. Samsonenko, A.D. Bouravleuv, K. Durose, Y.Y. Proskuryakov, B. Mendes, L. Bowen, M.A. Kaliteevski, R.A. Abram, D. Zeze // *Phys. Rev. B*, V. 82, 035302 (2010).
3. Р.Р. Резник, Г.Э. Цырлин, И.В. Штром, А.И. Хребтов, И.П. Сошников, Н.В. Крыжановская, Э.И. Моисеев, А.Е. Жуков // *Письма в Журнал технической физики*, V. 44, 55 (2018).
4. L. Leandro, C.P. Gunnarsson, R. Reznik, K.D. Jöns, I. Shtrom, A. Khrebtov T. Kasama, V. Zwiller, G. Cirlin, N. Akopian // *Nano letters*, V. 18, 7217 (2018).
5. L. Leandro, R. Reznik, J. D. Clement, J. Repän, M. Reynolds, E.V. Ubyivovk, I.V. Shtrom, G.E. Cirlin, N. Akopian // *Scientific Reports*, V. 10, 1 (2020).

# Усиление плазмонов в многоямных гетероструктурах HgTe/CdHgTe

А.О. Рудаков<sup>1,\*</sup>, В.Я. Алешкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*rudackovartur@ipmras.ru

Работа посвящена теоретическому изучению усиления плазмонов в многоямных гетероструктурах HgTe/CdHgTe. Найдены спектры плазмонов в структурах с 2 – 8 квантовыми ямами (КЯ) HgTe в гетероструктуре HgTe/CdHgTe и построен спектр коэффициента усиления плазмонов в данных структурах в условиях инверсной населенности зон. Показано, что увеличение числа КЯ приводит к увеличению коэффициента усиления плазмонов. Изучена зависимость пороговой концентрации неравновесных носителей заряда от количества КЯ в структурах с 1 – 8 КЯ.

## Введение

В гетероструктурах HgTe/CdHgTe с квантовыми ямами, благодаря малой ширине запрещенной зоны возможна когерентная генерация 2D плазмонов в области остаточных лучей GaAs. Усиление плазмонов в структуре с одиночной КЯ из HgTe теоретически изучалось в работах [1, 2], однако, вопрос об усилении плазмонов в многоямных гетероструктурах HgTe/CdHgTe до сих пор не исследовался.

Известно, что структура с N КЯ имеет N плазмонных мод. В данной работе получен спектр коэффициента межзонного усиления безузловых плазмонных мод в многоямных структурах. Безузловыми будем называть такие плазмоны, компонента электрического поля которых, лежащая в плоскости КЯ, не имеет нулей. Показано, что при заданных параметрах квантовых ям и двумерной концентрации неравновесных носителей заряда, величина коэффициента усиления плазмонов возрастает при увеличении числа КЯ. С увеличением числа КЯ обнаружено уменьшение пороговой концентрации неравновесных носителей заряда, при превышении которой возможна когерентная генерация и усиление плазмонов.

## Методика расчета

Спектр плазмонов в многоямных структурах находился с учетом пространственной дисперсии поляризуемости КЯ. Поляризуемость КЯ можно найти, используя формулу Линдхарда с учетом конечной частоты столкновений [2]. Частота релаксации фазы для недиагональных компонент матрицы плотности полагалась равной 1 мэВ для электронов и 2 мэВ для дырок. Для вычисления поляризуемости КЯ с учетом пространственной дисперсии необходимо знать

электронный спектр в КЯ. Для вычисления электронного спектра в КЯ использовалась модель Кейна с учетом деформационных эффектов. В расчетах мы полагали ширину КЯ равной 5 нм, температуру решетки – 4.2 К. Эффекты, обусловленные понижением симметрии на гетерограницах и отсутствием центра инверсии, не учитывались в силу их малости. Расстояние между КЯ полагалось равным 30 нм. С помощью метода трансфер-матрицы найдены спектры плазмонов в многоямных структурах Cd<sub>0.7</sub>Hg<sub>0.3</sub>Te/HgTe. Уравнение для определения спектра плазмонов в структуре с бесконечным числом КЯ было взято из работы [3].

В условиях инверсной населенности возможно усиление плазмонов за счет межзонных переходов электронов. Величина коэффициента усиления равна отношению разности мощностей, выделяемой в результате межзонных переходов с испусканием плазмонов и поглощаемой в результате друдевских потерь, к потоку энергии плазмона.

## Обсуждение результатов

Спектры плазмонов в многоямных структурах приведены на рис. 1.

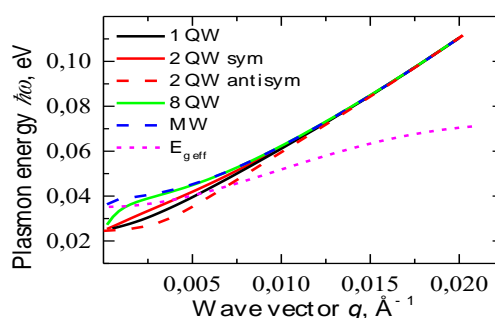


Рис. 1. Законы дисперсии плазмонов в многоямной структуре HgTe/CdHgTe ( $n = p = 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{eff} = 4.2 \text{ K}$ )

Спектр плазмонов в двухъямной структуре представлен двумя модами – симметричной (безузловой) и антисимметричной (имеющей один узел). В структурах с 3 и более КЯ рассматривались только безузловые плазмоны, поскольку, они обладают большим коэффициентом усиления, по сравнению с узловыми плазмонами. На рис. 1 также приведен спектр плазмонов в структуре с бесконечным числом КЯ (синяя пунктирная линия) и спектр плазмонов в структуре с 1 КЯ.

Закон дисперсии плазмона имеет низкочастотную и высокочастотную группы ветвей, образующиеся за счет взаимодействия с оптическими фонами [2]. Энергия плазмонов низкочастотной ветви меньше ширины запрещенной зоны в рассматриваемых КЯ, поэтому они не могут быть усилены и в данной работе не рассматриваются.

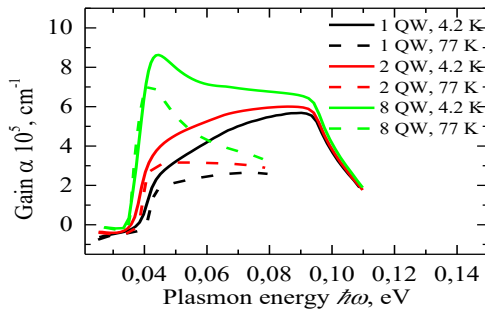


Рис. 2. Спектр коэффициента усиления плазмонов в многоямных гетероструктурах ( $n = p = 4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ )

На рис. 2 приведены спектры коэффициентов усиления плазмонов в многоямных структурах при двух эффективных температурах неравновесных носителей заряда. Эффективная температура электронов и дырок полагалась одинаковой. Из рис. 2 виден рост усиления плазмонов при увеличении числа КЯ. В низкоэнергетической области в спектре усиления преобладают друдевские потери. Усиление и генерация плазмонов возможна, если энергия плазмона превышает эффективную ширину запрещенной зоны  $E_{g\text{eff}}(q)$ . Это минимальная энергия плазмона, при которой он может быть испущен в результате межзонного перехода при данном волновом векторе  $q$ . Из рис. 1 видно, что при увеличении числа КЯ закон сохранения энергии и импульса для перехода с испусканием плазмона начинает выполняться при меньших значениях  $\omega$  и  $q$ . Это приводит к смещению низкоэнергетического края спектра усиления безузловых плазмонов в длинноволновую область. При увеличении эффективной температуры неравновесных носителей коэффициент усиления плазмона становится меньше. Это

происходит вследствие того, что уменьшается вероятность заполнения состояний под уровнем Ферми в зоне проводимости, и увеличивается вероятность заполнения состояний над уровнем Ферми в валентной зоне. В результате этого, число переходов между зонами уменьшается. При увеличении числа КЯ в спектре усиления безузловых плазмонов становится заметен пик в низкочастотной области. Слабое уменьшение пика при увеличении эффективной температуры неравновесных носителей объясняется тем, что генерация плазмонов на частоте, соответствующей данному пику, возникает вследствие переходов электронов между состояниями, лежащими вблизи дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. В рассматриваемом температурном интервале заселенность этих состояний слабо зависит от температуры.

На рис. 3 приведена зависимость пороговой концентрации неравновесных носителей заряда  $n_{th}$  от числа КЯ. Это такая концентрация неравновесных носителей, при которой максимальное значение коэффициента усиления равно нулю.

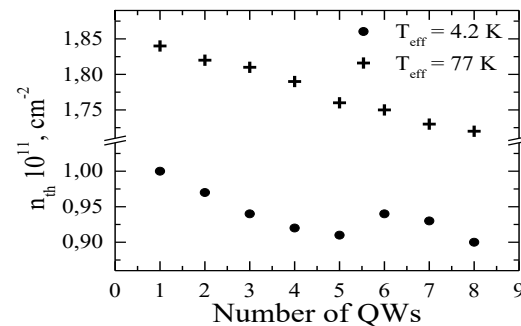


Рис. 3. Зависимость пороговой концентрации неравновесных носителей заряда от числа КЯ при двух эффективных температурах неравновесных носителей заряда

Из рис. 3 видно, что с увеличением числа КЯ пороговая концентрация немного уменьшается при выбранных температурах неравновесных носителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-42-09039).

## Литература

1. Kapralov K, Alymov G, Svintsov D and Dubinov A 2020 J. Phys.: Condens. Matter. 32 065301.
2. Aleshkin V. Y. et al. Stimulated emission of plasmon-LO mode in narrow gap HgTe/CdHgTe quantum wells //arXiv preprint arXiv:2106.04848. – 2021.
3. S. Das Sarma and J.J. Quinn, Phys. Rev. B 25, 7603 (1982).

# Управление типом и концентрацией азотных дефектов в вертикально ориентированных УНТ

Н.Н. Рудык\*, О.И. Ильин, О.И. Осотова, М.Р. Поливянова, М.В. Ильина

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, ул. Шевченко, 2, Таганрог, 347922.

\*nnrudyk@sfnu.ru

Экспериментально исследовано влияние температуры, толщины пленки катализатора и потока аммиака на концентрацию и распределение азотных дефектов, а также геометрические параметры УНТ. Экспериментально исследован пьезоэлектрический отклик массивов УНТ, максимальная величина которого составила 131 нА для УНТ, выращенных при температуре 660 °С, толщине катализатора 15 нм и отношении  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$ , равном 5. Показано, что с увеличением потока аммиака увеличивается концентрация дефектов пиррольного типа с 18 до 24 %, что приводит к проявлению бамбукообразной структуры УНТ и усилению пьезоэлектрического эффекта. Проведена оценка дефектности полученных структур на основе данных рамановской спектроскопии.

## Введение

Аномальный пьезоэлектрический эффект в углеродных нанотрубках (УНТ) делает их перспективным материалом для устройств преобразования энергии [1]. Предыдущие работы показали, что пьезоэлектрический эффект связан с включением в решетку УНТ атомов азота [2, 3]. При этом тип образующихся дефектов и их концентрация влияют на величину пьезоэлектрического отклика. Контроль концентрации и типа азотных дефектов в процессе роста УНТ является актуальной задачей.

В данной работе исследовалось влияние температуры, толщины пленки катализатора и потока аммиака на концентрацию и распределение азотных дефектов, а также геометрические параметры УНТ.

## Описание эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы Si (100) с подслоем TiN (100 нм) и катализатором Ni, нанесенными методом магнетронного распыления. Толщина катализатора изменялась в диапазоне от 5 до 30 нм, температура нагрева изменялась от 615 °С до 690 °С, а соотношение потоков технологических газов  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$  изменялось от 1:1 до 5:1. Для формирования вертикально ориентированных УНТ в процессе роста инициировалась плазма на постоянном токе. Полученные массивы УНТ исследовались методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), рамановской и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

## Обсуждение результатов

Анализ полученных данных показал, что во всем диапазоне исследуемых температур и толщин катализатора идет формирование вертикально ориентированных УНТ. Высота УНТ растет с увеличением толщины Ni, достигая максимума ( $46 \pm 0,7$  мкм) при температуре 645 °С и толщине катализатора 30 нм. Максимальный диаметр УНТ ( $116 \pm 25$  нм) получен при 615 °С и толщине катализатора 30 нм. Минимальный диаметр ( $32 \pm 12$  нм) был получен при 615 °С и толщине катализатора 5 нм. С увеличением температуры наблюдается увеличение диаметра УНТ за счет объединения мелких каталитических центров роста УНТ в более крупные при усилении поверхностной диффузии атомов никеля (рис. 1).

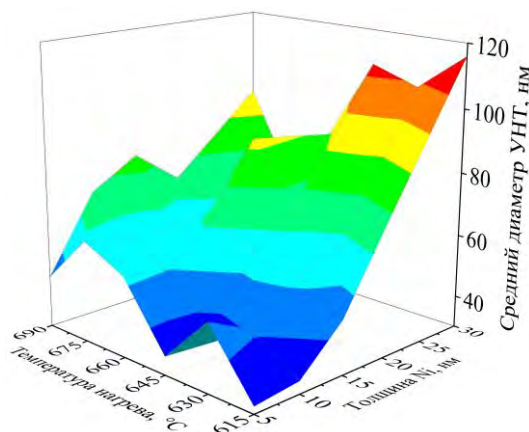
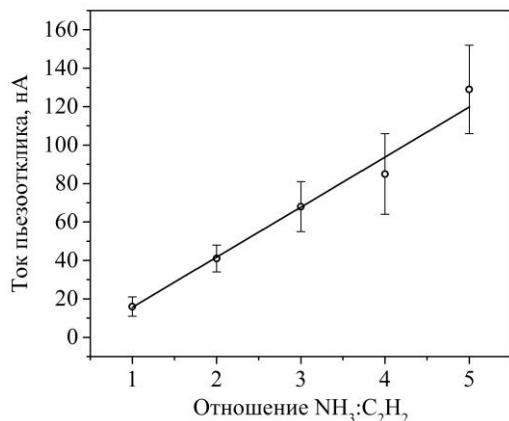


Рис. 1. Зависимость среднего диаметра УНТ от температуры нагрева и толщины катализатора

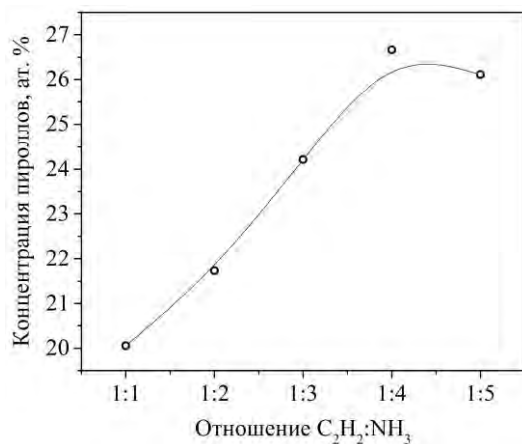
Максимальный пьезоэлектрический отклик 131 нА был получен для УНТ, выращенных при темпера-

туре 660 °С, толщине катализатора 15 нм и отношении  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$ , равном 5 (рис. 2). С увеличением толщины подслоя не наблюдается значительного перераспределения дефектов, однако происходит изменение геометрических параметров нанотрубок, что также позволяет изменять характеристики получаемых на их основе приборов.



**Рис. 2.** Зависимость концентрации дефектов пиррольного типа от соотношения  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$

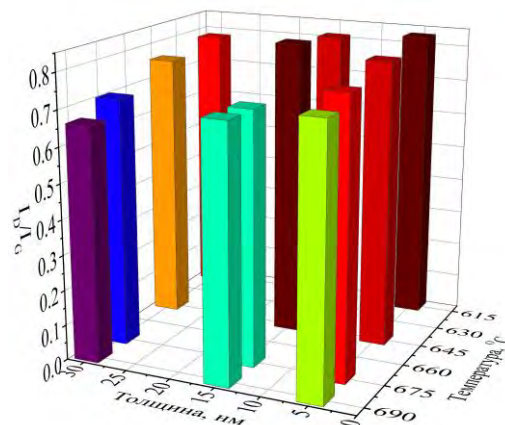
Общая концентрация азотных дефектов в УНТ практически не зависит от соотношения  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$ , при этом с увеличением потока аммиака увеличивается концентрация дефектов пиррольного типа с 18 до 24 % (рис. 3), что приводит к проявлению бамбукообразной структуры УНТ и усилению пьезоэлектрического эффекта. При увеличении соотношения  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$  от 1 до 5 пьезоэлектрический отклик возрастает от 18 нА до 162 нА.



**Рис. 3.** Зависимость концентрации дефектов пиррольного типа от соотношения  $\text{NH}_3:\text{C}_2\text{H}_2$

Анализ дефектности УНТ на основе соотношения  $I_D/I_G$  рамановских спектров показал, что с увеличе-

нием температуры и толщины пленки катализатора дефектность массивов УНТ уменьшается (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость соотношения  $I_D/I_G$  от температуры нагрева и толщины пленки катализатора

Наименьшая дефектность УНТ наблюдалась для УНТ, выращенных при 690 °С и толщине никеля 30 нм и составила  $I_D/I_G = 0.66$ . Наиболее дефектными ( $I_D/I_G=0.84$ ) являются УНТ, полученные при 615 °С и толщине пленки катализатора 5 нм.

## Заключение

Представленные результаты показывают, что температура нагрева и величина потока аммиака в процессе роста УНТ позволяют контролировать концентрацию азотных дефектов и их тип, при этом толщина пленки катализатора позволяет дополнительно управлять геометрическими параметрами массивов вертикально ориентированных УНТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2022-0001.

## Литература

1. Bo Wang, Yijia Gao, Shujun Zhang, Long-Qing Chen // Progress in Materials Science 106 (2019).
2. M.V. Il'ina, O.I. Il'in, A.V. Guryanov, O.I. Osotova, Yu.F. Blinov, A.A. Fedotov, O.A. Ageev // Journal of Materials Chemistry C 9 (2021).
3. M.V. Il'ina, O.I. Il'in, O.I. Osotova, S.A. Khuzbezhov, N.N. Rudyk, I.V. Pankov, A.A. Fedotov, O.A. Ageev // Carbon 190 (2022).

# Длинноволновое стимулированное излучение в структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при непрерывной оптической накачке с интенсивностью $\sim 1$ Вт/см<sup>2</sup>

В.В. Румянцев<sup>1,2,\*</sup>, А.А. Дубинов<sup>1,2</sup>, В.В. Уточкин<sup>1,2</sup>, А.В. Антонов<sup>1,2</sup>, М.А. Фадеев<sup>1,2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>3</sup>, С.А. Дворецкий<sup>3</sup>, В.И. Гавриленко<sup>1,2</sup>, С.В. Морозов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*rumyantsev@ipmras.ru,

В структурах с КЯ на основе HgCdTe продемонстрировано стимулированное излучение на межзонных переходах с длиной волны 23°–27 мкм и минимальной пороговой интенсивностью возбуждения менее 1 Вт/см<sup>2</sup> при 8К, что создает предпосылки для реализации источников излучения в спектральном диапазоне, недоступном для существующих квантовых каскадных лазеров.

## Введение

На протяжении последних десятилетий достигнут значительный прогресс в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии структур на основе твердых растворов HgCdTe, в связи с чем наблюдается рост числа исследований этого материала и гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на его основе. Недавние исследования показывают, что такие структуры могут быть перспективными для создания длинноволновых лазеров [1]. На длинах волн 16°–30 мкм в HgCdTe практически отсутствует решеточное поглощение, препятствующее продвижению в обозначенный диапазон квантовых каскадных лазеров (ККЛ) на основе “традиционных” АЗВ5 материалов GaAs и InP. Несмотря на значительные успехи ККЛ на основе InAs/AlSb и наличие лазеров на основе халькогенидов свинца-олова, в литературе отмечается нехватка когерентных перестраиваемых источников в диапазоне длин волн 16–30 мкм [2, 3].

В данной работе за счет оптимизации энергетического спектра носителей и диэлектрических волноводов в структурах с КЯ на основе HgCdTe продемонстрировано стимулированное излучение (СИ) с длиной волны 23°–27 мкм и минимальной пороговой плотностью мощности возбуждения менее 1 Вт/см<sup>2</sup>, что создает предпосылки для реализации источников излучения в спектральном диапазоне, недоступном для существующих ККЛ.

## Методика эксперимента

Спектры СИ были измерены с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, работающего в режиме пошагового сканирования. Детальное описание экспериментальной установки можно найти в работе [1]. Накачка осуществлялась СО<sub>2</sub> лазером с длиной волны 10.6 мкм. В случае импульсного лазера максимальная интенсивность накачки составляла  $\sim 100$  кВт/см<sup>2</sup> при длительности импульса 100 нс. Также был использован непрерывный СО<sub>2</sub> лазер с возможностью внутреннего формирования импульсов произвольной скважности длительностью от 100 мкс. Исследуемые структуры были выращены на подложках GaAs(013) и содержали волноводный слой широкозонного твердого раствора Cd<sub>0.65</sub>Hg<sub>0.35</sub>Te толщиной несколько микрон, внутри которого были выращены 15–20 КЯ из Hg<sub>0.935</sub>Cd<sub>0.065</sub>Te. Образец располагался в криостате замкнутого цикла с возможностью регулировки температуры от 8 до 300 К.

## Результаты и обсуждение

Использование «Reststrahlen»-волновода в работе [1] позволило получить СИ на длине волны 31 мкм при 8К, однако при этом линия СИ практически не смещается в сторону коротких длин волн с увеличением температуры в соответствии с увеличением ширины запрещенной зоны (рис. 1). Последнее свя-



зывается с «вытеканием» моды в GaAs-подложку в области 25 – 30 мкм, которое хорошо заметно на зависимостях фактора оптического ограничения и модовых потерь (МП) для структур с различной толщиной буфера CdTe, выращиваемого на подложке перед волноводными слоями структуры (см. максимум в окрестности 45 мэВ на рис. 2).

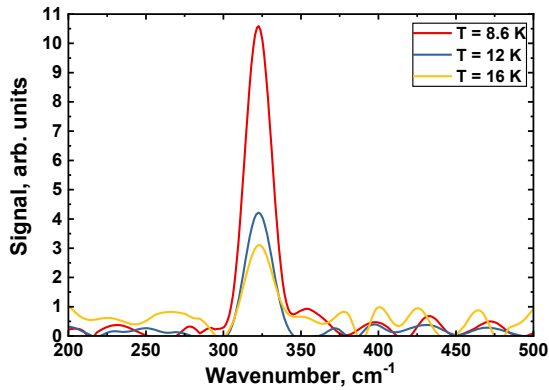


Рис. 1. Спектры СИ структуры 190419 при различных температурах

Так как в реальных структурах совокупная толщина эпитаксиальных слоев ограничена возможностями используемой ростовой технологии были выполнены расчеты, направленные на оптимизацию волноводов исследуемых структур с учетом минимизации общей толщины структуры (Рис. 2).

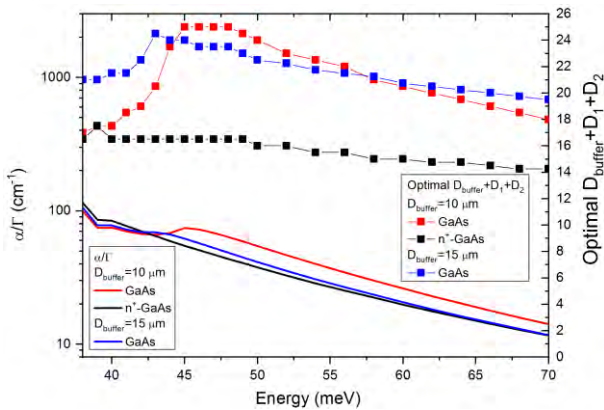


Рис. 2. Зависимость фактора оптического ограничения и МП для оптимизированных дизайнов структур (выращенных на буфере CdTe различной толщины и полуизолирующей и легированной GaAs-подложках)

Было установлено, что увеличение толщины CdTe буфера до 15 мкм позволяет уменьшить порог возникновения СИ на 3 порядка по сравнению с предыдущими работами за счет улучшения локализации TE<sub>0</sub> моды и уменьшения МП приблизительно в 30 раз (рис. 3, вставка). Благодаря этому удалось получить СИ в условиях квазинепрерывного воз-

буждения с шириной линии менее 0.5 мэВ при интенсивности возбуждения 0.8°–0.3 Вт/см<sup>2</sup>, а также увеличить длину волны СИ до 27 мкм при импульсном возбуждении (рис. 3). Отметим, что в структурах, выращенных на легированной GaAs-подложке согласно расчетам можно получить сравнимое уменьшение МП при существенно меньших толщинах волноводных слоев (рис. 2). Тем не менее, при экспериментальных исследованиях таких структур порог возникновения СИ на длине волны ~ 23 мкм удалось понизить лишь до 200 Вт/см<sup>2</sup>.

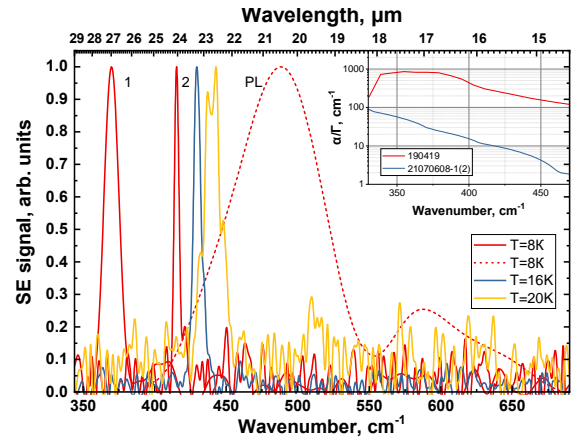


Рис. 3. Спектры СИ и фотолюминесценции (PL) структуры 17060708-1 (1) и 17060708-2 (2). На вставке приведено сравнение зависимостей МП от длины волны для структур 190419 и 17060708-1(2)

В заключение отметим, что полученные результаты позволяют рассчитывать на возможность реализации когерентных источников излучения на основе исследуемых структур при оптической накачке ККЛ среднего ИК диапазона. Такие «конверторы» частоты излучения представляют интерес, так как создание инжекционного лазера на HgCdTe наталкивается на значительные трудности, связанные с легированием р-типа. Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-906).

### Литература

1. S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev *et al.* // ACS Photonics V. 8, 3526-3535 (2021).
2. K. Feng, W. Streyer, Y. Zhong *et al.* // Opt. Express, V. 23, A1418-A1433 (2015).

M. Lamperti, R. Gotti, D. Gatti *et al.* // Communications Physics, V. 3, 175 (2020).

# Интеркаляция буферного слоя графена на SiC(0001) атомами Co и Au для применения в спинтронике

А.А. Рыбкина<sup>1,\*</sup>, С.О. Фильнов<sup>1</sup>, А.В. Тарасов<sup>1</sup>, А.В. Ерыженков<sup>1</sup>, Д.А. Глазкова<sup>1</sup>, Д.А. Пудиков<sup>1</sup>, М.В. Лихолетова<sup>1</sup>, А.М. Шикин<sup>1</sup>, А.Г. Рыбкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, 199034.

\*a.rybkina@spbu.ru

Проведено исследование модификации электронной энергетической структуры буферного слоя графена, синтезированного на подложке 6H-SiC(0001), при интеркаляции атомов Co, а также проведена последующая интеркаляция атомов Au. Было показано, что интеркаляция атомов кобальта под буферный слой на SiC приводит к его трансформации в монослой графена. В электронной структуре наблюдается формирование конуса Дирака и электронных состояний, характерного для квазисвободного графена. При этом между графеном и подложкой SiC образуется ультратонкая силицидная структура CoSi/CoSi<sub>2</sub>. Исследование магнитных свойств полученной системы методом SQUID-магнитометрии показало ферромагнитное упорядочение магнитных моментов в плоскости поверхности. Результаты последующей интеркаляции атомов Au показывают модификацию электронной структуры графена и являются основой для будущего применения магнитно-спин-орбитального графена в спинтронике.

## Введение

Одной из наиболее ожидаемых реализаций графена в спинтронике является магнитно-спин-орбитальный графен [1], который состоит из хорошо упорядоченного графена, контактирующего с сильным ферромагнетиком (кобальтом) и тяжелым металлом (золотом или платиной). При взаимодействии с кобальтом и золотом графен не только сохраняет свои уникальные характеристики, но и частично перенимает свойства этих металлов - магнетизм и спин-орбитальное взаимодействие. При этом для успешного применения такого графена в элементах устройств требуется синтезировать его на изолирующей подложке. Поэтому реализация магнитно-спин-орбитального графена на полупроводниковой подложке SiC является ожидаемой и вполне актуальной задачей. Кроме того, комбинация сильного спин-орбитального взаимодействия и магнетизма в графен-содержащей системе на SiC может стать перспективной площадкой для наблюдения квантового аномального эффекта Холла в графене (QANE) [2, 3].

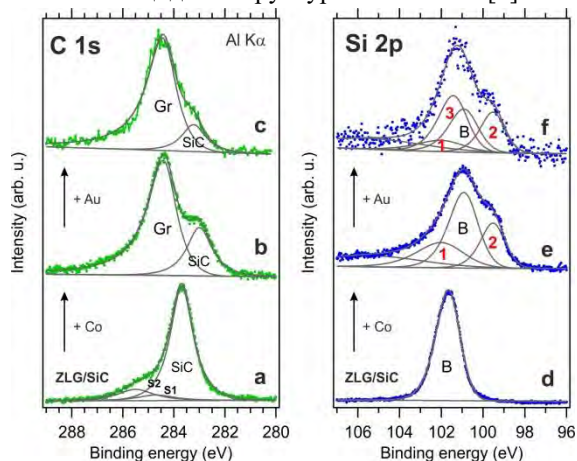
## Результаты и обсуждение

Синтез образцов и исследование методом фотоэлектронной спектроскопии (XPS и ARPES) проводились на оборудовании ресурсного центра ФМИП Научного парка СПбГУ. Исследование магнитных свойств синтезируемой системы проводилось с помощью SQUID-магнитометрии в ресурсном центре ДФММФН Научного парка СПбГУ. В качестве под-

ложки использовались Si-терминированные пластины 6H-SiC(0001). Известно, что при высокотемпературном отжиге SiC происходит формирование однослойного графена предшествует стадия реконструкции ( $6\sqrt{3}\times 6\sqrt{3}$ )R30° поверхности SiC, которая и называется буферным слоем графена на SiC(0001) [4,5]. Интеркаляция кобальта осуществлялась путем нанесения пленки Co толщиной 20 Å на предварительно синтезированный буферный слой графена на SiC и прогревом системы при T=450°C. Последующая интеркаляция золота проводилась путем напыления 3.2 Å Au на сформированную систему и прогревом при T=500°C.

На рис. 1(a,b) показаны изменения XPS спектров уровня C 1s после интеркаляции кобальта под буферный слой графена. Спектр C 1s для буферного слоя графена на SiC(0001) имеет характерную форму из трех компонент: компонента при энергии 283.6 эВ соответствует углероду в SiC, и две компоненты (S1 (284.7 эВ) и S2 (285.5 эВ)) соответствуют связям углерода в буферном слое [4,5]. После интеркаляции Co в спектре C 1s наблюдается уменьшение компонент S1 и S2 и компоненты карбида. При этом появляется новая интенсивная компонента при энергии 284.4 эВ, характерная для монослоя графена [4,5]. Изменение формы XPS спектра уровня Si 2p показано на рис. 1(d,e). После интеркаляции Co форма спектра Si 2p имеет многокомпонентный характер. Кроме объемной компоненты (B) появляются две дополнительные линии, которые связаны с формированием силицидов кобальта – CoSi (1) и CoSi<sub>2</sub> (2). Детальный анализ фо-

тоэлектронных спектров C 1s, Si 2p, Co 2p показали, что интеркаляция атомов Co приводит к трансформации буферного слоя в монослой графена [6]. В сочетании с данными HRTEM было продемонстрировано, что интеркаляция Co между графеном и подложкой SiC приводит к образованию ультратонкой силицидной структуры CoSi/CoSi<sub>2</sub> [6].

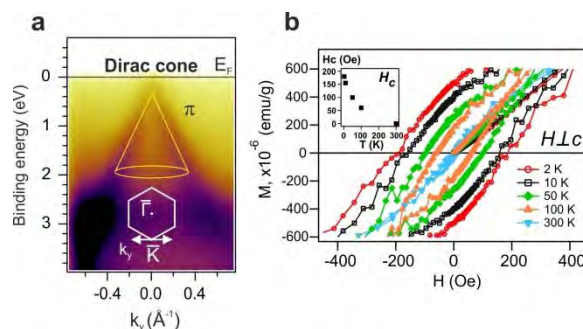


**Рис. 1.** XPS спектры C 1s (a, b) и Si 2p (d, e) до и после интеркаляции Co под буферный слой графена на SiC(0001). (c) и (f) – Соответствующие XPS спектры после последующей интеркаляции Au. Энергия фотонов 1486,6 эВ

На рис. 2(a) представлены ARPES данные для графена после интеркаляции Co, измеренные в области точки K поверхностной зоны Бриллюэна. В электронной структуре наблюдается формирование конуса Дирака  $\pi$  электронных состояний, характерного для квазисвободного графена.

Исследование магнитных свойств полученной системы показало ферромагнитное упорядочение магнитных моментов в плоскости поверхности, а на кривых намагничивания  $M(H)$  наблюдается петля гистерезиса с коэрцитивной силой до 180 Э. Ожидается, что магнитные свойства синтезируемой системы могут быть обусловлены наличием ультратонкого слоя CoSi под графеном.

Последующая интеркаляция атомов Au в сформированную систему Gr/Co-Si/SiC приводит к модификации фотоэлектронных спектров XPS и ARPES. Соответствующие XPS спектры внутренних уровней C 1s и Si 2p представлены на рис. 1(c,f). Было показано, что под графеном формируется сложная структура, содержащая силициды кобальта (1,2) и силицид золота (3).



**Рис. 2.** (a) Конус Дирака электронных  $\pi$  состояний монослоя графена после интеркаляции Co в области точки K зоны Бриллюэна графена. Энергия фотонов 40.8 эВ. (б) Кривые намагничивания  $M(H)$  образца, измеренные при различных температурах и при приложении внешнего магнитного поля вдоль плоскости образца

## Заключение

В работе синтезирован квазисвободный графен, контактирующий с магнитной подложкой, и сохраняющий при этом уникальную для графена электронную структуру в виде линейного конуса Дирака в области точки K. Результаты последующей интеркаляции атомов Au в сформированную систему Gr/Co-Si/SiC показывают модификацию электронной структуры графена и являются основой для применения магнитно-спин-орбитального графена в спинтронике.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-00031).

## Литература

1. A. G. Rybkin, *et al.* // Nano Letters 18 (3), pp. 1564–1574 (2018).
2. Z. Qiao, *et al.* // Phys. Rev. B 82, 161414 (2010).
3. X. Deng, *et al.* // Phys. Rev. B 95, 121410(R) (2017).
4. K. V. Emtsev *et al.* // Phys. Rev. B 77, 155303 (2008).
5. C. Riedl *et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 43, 374009 (2010).
6. A. A. Rybkina, *et al.* // Phys. Rev. B 104, 155423 (2021).

# Электронные и дырочные капли в топологическом изоляторе $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ : спиновый резонанс и влияние на транспортные свойства

В.О. Сахин\*, Е.Ф. Куковицкий, Ю.И. Таланов, Г.Б. Тейтельбаум

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, 420029.

\*vsakhin@yahoo.com

С помощью метода электронного спинового резонанса в объеме трёхмерного топологического изолятора  $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$  были обнаружены наноразмерные зарядовые капли. Электроны и дырки в таких каплях могут участвовать в объемной проводимости только благодаря термической активации или прыжковому механизму. Наши транспортные измерения показали, что при больших температурах объемная проводимость может иметь перколяционный характер, однако с понижением температуры механизм проводимости меняется на прыжковый.

## Введение

Трёхмерные топологические изоляторы (ТИ) выделяются характерной особенностью – бесщелевым поверхностным состоянием, которое проявляет необычные квантовые свойства: жёсткая связь спина и импульса (спин-импульсный локнинг) и защищенность от немагнитного рассеяния. Однако, большинство известных трёхмерных ТИ на сегодня обладают достаточно высокой объемной проводимостью, поэтому свойства поверхности сложно наблюдать в транспортных измерениях. Подавление объемной проводимости в ТИ достигается за счёт компенсации свободных носителей тока при помощи примесных ионов. Это в свою очередь приводит к появлению зарядовых дефектов, которые не экранируются из-за небольшого числа носителей. В объеме ТИ появляются зарядовые капли, известные в физике полупроводников [1, 2]. Для изучения таких образований хорошо подходят различные локальные методы. Одним из таких является электронный спиновый резонанс (ЭСР).

Наши исследования были проведены на трёхмерном ТИ  $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$  (BSSTS) изоструктурном теллуриде висмута. По данным СТМ спектроскопии наших образцов [3] величина запрещенной зоны в объеме составляет  $E_g=330$  мэВ.

## Спиновый резонанс

Типичный сигнал ЭСР BSSTS (рис. 1) состоит из двух линий, наблюдающихся в полях от 150 до 250 Э. Низкополевой пик соответствует дыркам, вы-

сокополевой – электронам (более подробно рассмотрено в [4]). Из анализа наблюдаемого сигнала с помощью стандартного выражения для  $g$ -фактора  $g^2 = g_{\perp}^2 \cos^2 \theta + g_{\parallel}^2 \sin^2 \theta$  мы определили для дырок:  $g_{\perp} = 28.3 \pm 1$ ;  $g_{\parallel} = 47.4 \pm 1$  и для электронов:  $g_{\perp} = 26.4 \pm 1$ ;  $g_{\parallel} = 44.7 \pm 1$ . Такие большие величины  $g$ -факторов объясняются наличием сильного спин-орбитального взаимодействия, характерного свойства ТИ.

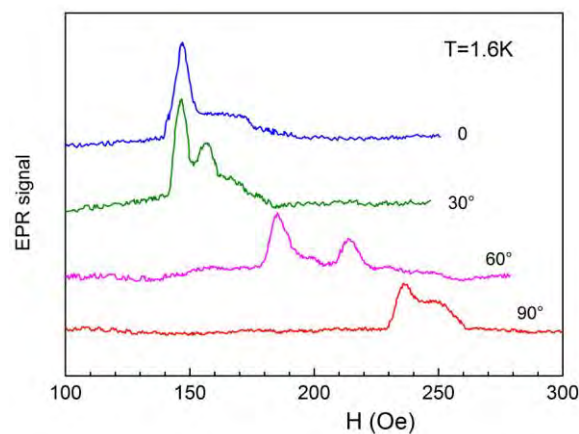


Рис. 1. Сигнал ЭСР BSSTS в зависимости от ориентации магнитного поля относительно оси  $c$

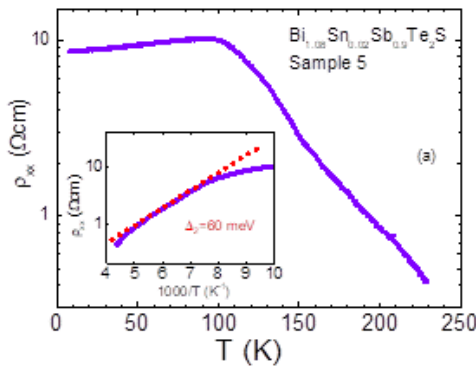
Интегральная интенсивность сигналов, как известно, соответствует магнитной восприимчивости спинов, участвующих в резонансе. Для сигнала от носителей заряда характерно отсутствие зависимости интегральной интенсивности от температуры в соответствии с законом Паули. Однако, интегральная интенсивность наблюдаемого сигнала растёт с понижением температуры согласно закону Кюри. Для системы без магнитных ионов такое поведение



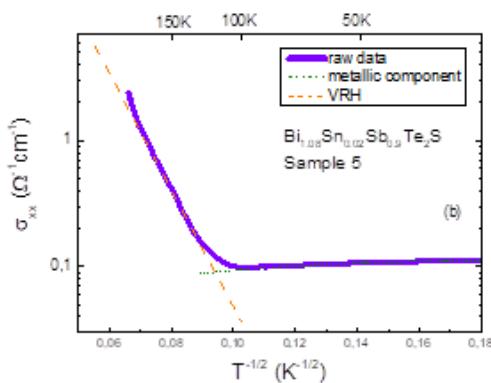
может быть свидетельством того, что носители заряда в объеме организованы в виде случайно распределённого ансамбля наноразмерных «металлических» частиц [5].

### Транспортные измерения

Ни рисунке 2 показан характерная зависимость сопротивления BSSTS от температуры. При охлаждении от комнатной температуры сопротивление растёт экспоненциально, достигает максимума при  $T=100$  К, при дальнейшем понижении температуры сопротивление падает. Величина энергетической щели между уровнем Ферми и дном зоны проводимости составляет 60 мэВ (см. вставка на рис.2), что намного меньше, чем определённая по данным СТМ  $E_g/2=165$  мэВ. Можно оценить  $\Delta=0.18E_g$ , что близко к  $\Delta=0.17E_g$  - перколяционному порогу при наличии трёхмерного случайного потенциала, обеспечивающего возможность перколяционной проводимости.



**Рисунок 2.** Температурная зависимость  $\rho_{xx}$ , вставка: зависимость  $\rho_{xx}$  от обратной температуры  $1/T$ .



**Рисунок 3.** Зависимость проводимости  $\sigma_{xx}(=1/\rho_{xx})$  от  $T^{-1/2}$ , толстая пунктирная линия соответствует закону Эфроса-Шкловского для прыжкового механизма  $\sigma_{xx} \sim \exp\{-(T_{ES}/T)^{1/2}\}$ .

При достаточно низких температурах становится возможным туннелирование электронов и дырок между зарядовыми каплями и активационный механизм проводимости сменяется прыжковым. Сопротивление при этом будет следовать закону Эфроса-Шкловского [1,2]  $\rho=\rho_0 \cdot \exp\{(T_{ES}/T)^{1/2}\}$ , где  $T_{ES}$  – характерная температура (см. рис. 3). Для BSSTS мы определили  $T_{ES}=3200$  К, смена механизма проводимости происходит при 60-70 К.

### Заключение

Первая часть нашей работы посвящена бесконтактной визуализации локальных спиновых и зарядовых неоднородностей при помощи ЭСР. Анализ обнаруженного сигнала ЭСР показал, что носители заряда, участвующие в резонансе, представляют собой случайно распределённые в объеме образца электронные и дырочные капли. Предполагается, что носители заряда в этих каплях не участвуют в обычном транспорте, так как они не могут свободно перемещаться из одной капли в другую.

Наши транспортные исследования BSSTS показали, что при относительно высоких температурах электронная и дырочная проводимости носят активационный характер, но соответствующие энергии активации намного меньше величины запрещённой зоны  $\Delta=0.17E_g$ . Кроме того, при достаточно низких температурах ( $<60$  К) возможно туннелирование электронов и дырок между каплями, то есть активационный механизм проводимости меняется на прыжковый.

### Благодарности

Работа частично выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта №20-02-00910.

### Литература

1. B.Skinner, T.Chen, and B.I. Shklovskii // Phys. Rev. Lett. 109, 176801 (2012)
2. B.I. Shklovskii A.L. Efros. // Electronic Properties of Doped Semiconductors, Springer-Verlag (1984)
3. В. Сахин и др. // Письма в ЖЭТФ 115, 4 (2022)
4. V.Sakhin, E.Kukovitsky, Yu.Talanov, G.Teitelbaum // JETP Letters, 113, 273-278 (2021)
5. L.P. Gor'kov, G.M. Eliashberg // JETP 48, 1407 (1965)

# Применение LIGA-технологии для создания матрицы МОЭМС

Д.А. Семиков\*, П.В. Волков, Е.А. Архипова, Е.А. Вopilкин, А.В. Горюнов, С.А. Краев, А.Ю. Лукьянов, А.И. Охапкин, А.Д. Тертышник.

Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*semikovda@ipmras.ru

Предложена модифицированная LIGA-технология для создания матрицы из вывешенных мембран произвольной геометрии. Проведено исследование статических и динамических характеристик различных мембран.

В настоящее время одним из основных направлений развития сенсоров является их миниатюризация. Один из способов миниатюризации сенсоров различных физических величин состоит в использовании достижений в волоконно-оптической технике, произошедших в последние годы. Ярким примером этого являются миниатюрные волоконно-оптические сенсоры, созданные на базе Микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) [1, 2]. Они состоят из чувствительного элемента, созданного по технологии МОЭМС, который крепится на оптическом волокне. Изменения состояния чувствительного элемента изменяют параметры зондирующего света, который подводится и отводится по этому же волокну. Анализ изменений параметров зондирующего света происходит в измерительном блоке, который может находиться вдали от зоны измерений.

В данной работе для создания МОЭМС использовалась оригинальная модифицированная LIGA-технология [3]. Предложенная технология позволяет использовать в качестве подложки практически

любой изолирующий материал и получать вывешенные мембраны практически произвольной геометрии.

Структура МОЭМС формировалась на подложке i-GaAs. в несколько этапов [4]:

1. формирование нижнего электрода;
2. формирование слоя защитного диэлектрика;
3. формирование мембраны;
4. освобождение мембраны.

В результате на одном чипе была сформирована матрица мембран (рис 1.а) различной формы, с возможностью электрического управления их положением. Управление производилось путем подачи напряжения на мембрану и на электрод, проходящий под мембраной.

Для удобства подключения, мембраны соединены рядами. На рисунках 1.б-ж приведены фотографии мембран, полученные с помощью электронного микроскопа. Размер вывешенной части составляет порядка 100х100 мкм.

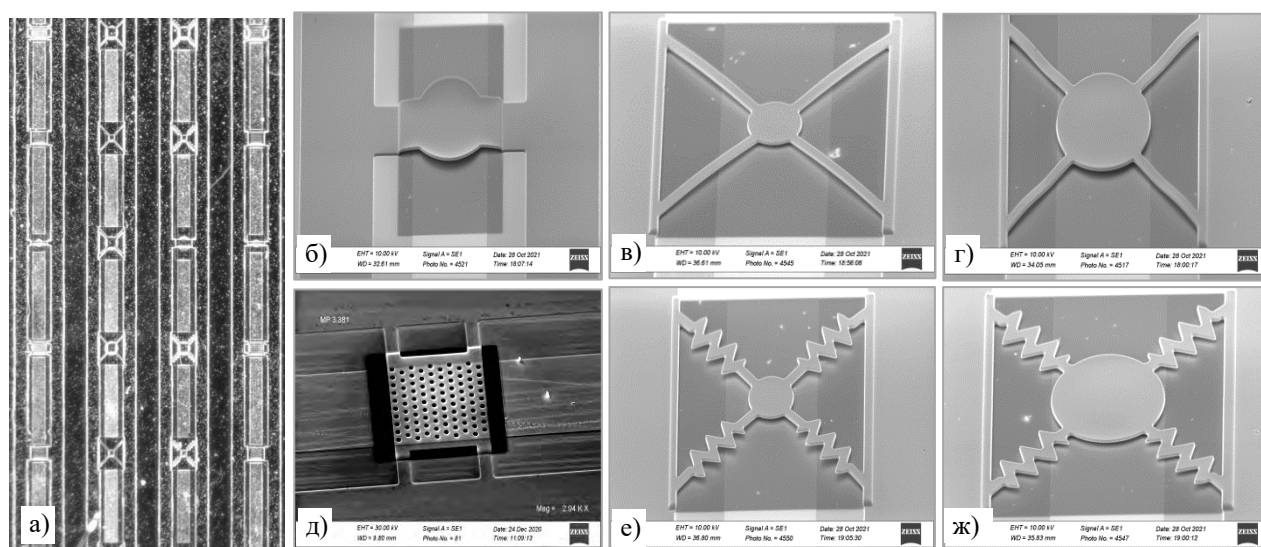


Рис. 1. а) Матрица мембран. б-ж) Мембраны различной геометрии



Величина смещения мембран в зависимости от приложенного постоянного напряжения была получена с помощью интерферометра белого света (WLI) TalySurfCCI 2000 (Taylor&Hobson).

Наилучшие результаты показали мембраны с пружинным подвесом (см. рис 1 е, ж). При подаче напряжения они обеспечивали трансляционное перемещение без заметных перекосов. График смещения мембран от подаваемого напряжения приведен на рис. 2. Характерная чувствительность составила 10-20 нм/В.

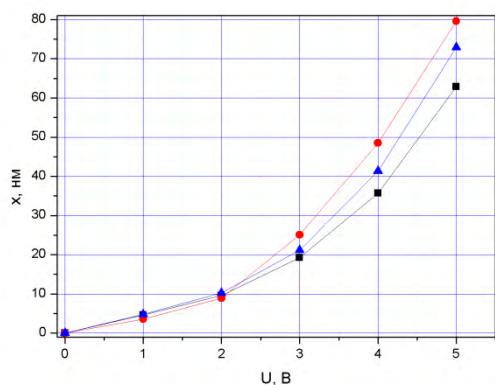


Рис. 2. Смещение трех мембран с пружинным подвесом при подаче постоянного напряжения

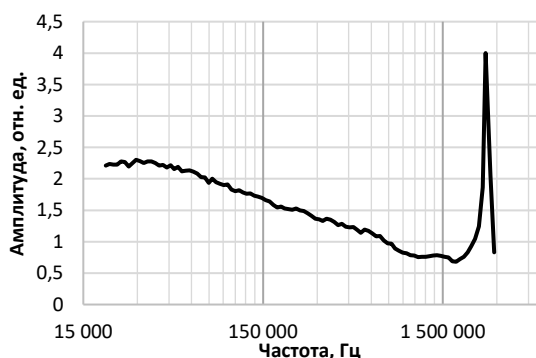


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика мембраны с пружинным подвесом

Для исследования динамических характеристик мембран на них подавалось переменное синусои-

дальное напряжение. Смещение мембраны регистрировалось интерференционным методом. Для этого над измеряемой мембраной помещалось оптическое волокно и регистрировалась интерференция на зазоре «торец оптического волокна» – «мембрана». На рис 3 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) мембран с пружинным подвесом (рис. 1.е). Видно, что АЧХ гладкая, без резонансов в широком диапазоне частот вплоть до 1.5 МГц.

## Выводы

Предложена модифицированная LIGA-технология, позволяющая получать подвешенные микро-мембраны различной геометрии. Благодаря использованию данной технологии была получена матрица мембран различной формы. Исследование статических и динамических характеристик созданных мембран позволило получить устройство с оптимальными электромеханическими свойствами. В значительной степени этого удалось добиться за счёт использования пружинного подвеса мембран. Гладкая, вплоть до 1.5 МГц АЧХ разработанных мембран позволяет использовать такие элементы для калибровки измерительных систем.

Поддержано НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

## Литература

1. Majid Taghavi et. al. J. Lightwave Technol. 37, 1893-1902 (2019).
2. Arash Sheikholeh et.al. J. Lightwave Technol. 34, 5244-5249 (2016).
3. Michael Bohling et. al. Appl. Opt. 51, 5989-5995 (2012).
4. P. Volkov, et al. // Systems. Sensors, 21, 7343 (2021).

# Исследование влияния механических напряжений на расщепление спиновых подуровней в гетероструктурах AlN/SiC

А.М. Скоморохов<sup>1,2,\*</sup>, И.Д. Бреев<sup>1,2</sup>, И.П. Вейшторт<sup>1,2</sup>, С.С. Нагалюк<sup>1</sup>,  
Е.Н. Мохов<sup>1</sup>, П. Г. Баранов<sup>1</sup>, А.Н. Анисимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, д. 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет, лаборатория диагностики углеродных материалов и спиново-оптических явлений в широкозонных полупроводниках, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163001.

\*artomskom@gmail.com

Было показано влияние механической деформации на расщепление спиновых подуровней вакансионных центров со спином  $S = 3/2$  в карбиде кремния в условиях комнатной температуры. Для структуры AlN/SiC были вычислены значения напряжений вблизи гетероинтерфейса. Найдена величина спин-механического взаимодействия для центра V2 в 4H-SiC и 6H-SiC при использовании метода оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР).

## Введение

В последнее время, спиновым подуровням в карбиде кремния уделяют большое внимание, а все из-за возможности создания различных квантовых устройств. К примеру, они могут быть использованы для квантовой сенсорики и обработки информации, а также для элементов нанофотоники. Центры, основой которых являются вакансии кремния со спином  $3/2$  обладают уникальным свойством оптического выстраивания при комнатных температурах. Поэтому квантовое состояние центра можно считывать с помощью метода ОДМР. При использовании метода ОДМР вместе с конфокальной спектроскопией комбинационного рассеяния света (КРС) возможно совместное определение расщепления спиновых подуровней и напряжений в решетке благодаря сдвигу фононных мод КРС.

## Описание работы

Гетероструктура AlN/SiC выращивалась сублиминационным сэндвич-методом. Подложки карбида кремния были выращены при температуре 2200 °С в камере в атмосфере аргона. Кристаллы AlN выращивают в камерах при температуре около 2000 °С. Облучение кристаллов потоком электронов с энергией 2 МэВ позволяет создать вакансионные центры, которые оказываются наиболее однородно распределенными в объеме кристалла.

Экспериментальная установка состоит из оптической системы накачки и регистрации, модуля магнитного поля, синхронного детектора и электронной

системы управления. Оптическая накачка происходит с помощью лазера с длиной волны 785 нм и мощностью 100 мВт для регистрации ОДМР, а также с помощью лазера с длиной волны 532 нм и мощностью 5 мВт для регистрации КРС и фотолюминесценции (ФЛ). Лазер работает в непрерывном режиме.

Сбор сигнала осуществлялся с использованием конфокальной системы и стократного объектива, а также входного пинхола 100 мкм, что позволило собрать сигнал из объема менее 5 мкм<sup>3</sup>. Упрощенная схема регистрации ОДМР приведена на рисунке 1.

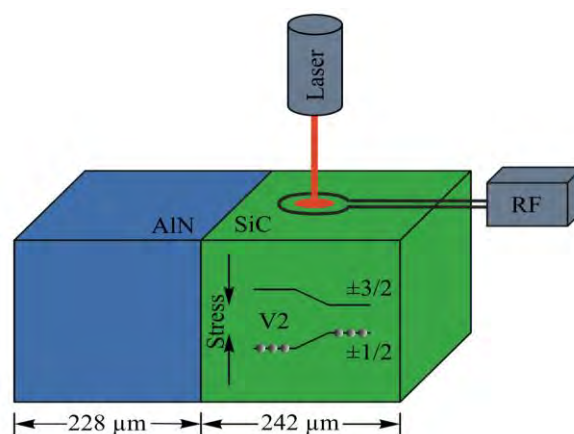


Рис. 1. Изображение гетероструктуры AlN/SiC, а также упрощенной схемы регистрации ОДМР

Были получены спектры КРС и ОДМР для 4H-SiC и 6H-SiC, в зависимости от расстояния от гетерограницы.

Было определено, что максимальные значения компонент тензора напряжений наблюдаются на гетерогранице и составляют для 4Н-SiC:  $\sigma_1 = -0.19$  ГПа и  $\sigma_t = -0.87$  ГПа. А для 6Н-SiC:  $\sigma_1 = -0.64$  ГПа и  $\sigma_t = -0.15$  ГПа [1]. Учитывая деформации, эффективный спиновый Гамильтониан в отсутствии внешнего магнитного поля можно представить в виде

$$H = (S_z^2 - 3/4) \cdot [\Xi(u_{zz} - (u_{xx} + u_{yy})/2) + \Xi'(u_{zz} + (u_{xx} + u_{yy})/2) + D_0], \quad (1)$$

где  $D_0$  – параметр тонкой структуры без учета механических напряжений,  $\Xi$  и  $\Xi'$  – компоненты тензора спин-деформационного взаимодействия,  $u_{ij}$  – компоненты тензора деформаций. Гамильтониан (1) записывается с учетом механических деформаций в одноосном приближении. В случае такой деформации расщепление спиновых подуровней вакансионных центров в SiC в нулевом магнитном

поле  $\Delta$  будет зависеть от компонент тензора напряжений как:

$$\Delta = 2[\Xi(u_l - u_t) + \Xi'(u_l + u_t) + D_0] \quad (2)$$

поскольку для одноосной деформации по оси  $z$  можно сказать, что  $u_t = u_{xx} = u_{yy}, u_l = u_{zz}$ .

Спектры ОДМР для 4Н и 6Н представлены на рисунке 2. По расщеплению спиновых подуровней в нулевом магнитном поле можно определить положение резонанса, которое относится к вакансионным центрам V2 и V1/V3.

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

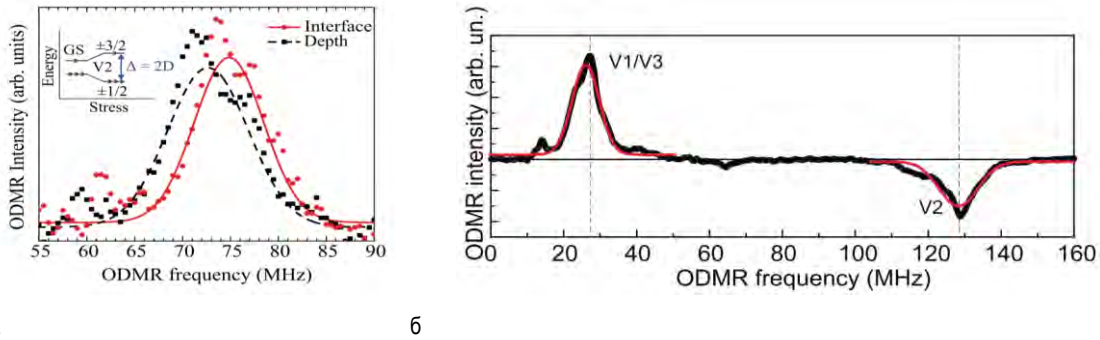


Рис. 2. Полученные спектры ОДМР для карбида кремния: (а) – спектр ОДМР центра V2 в 4Н-SiC, (б) – спектр ОДМР центров в 6Н-SiC

### Заключение

В работе было оценено влияние механических напряжений на спиновые свойства вакансионных центров V1/V3, V2 в кристаллах 4Н/6Н-SiC. Возможен механический контроль расщепления тонкой структуры между спиновыми уровнями со спином  $\pm 1/2$  и  $\pm 3/2$  для вакансионных центров в SiC за счет механических напряжений.

Был разработан метод оценки тонкой структуры по спектрам КРС, что позволяет рассчитывать спиновые свойства наночастиц SiC, а также прогнозировать магнитометрические параметры наносенсоров на основе нанокристаллов. Проведенное исследование может пролить свет на качество интерфейса широкополосных полупроводниковых гетероструктур AlN/SiC, их внутреннюю структуру и поведение.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00216).

### Литература

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

# Мощные одномодовые лазерные диоды и линейки на основе InGaAs/AlGaAs асимметричных гетероструктур

С.О. Слипченко\*, И.С. Шашкин, А.Ю. Лешко, П.С. Копьев, Н.А. Пихтин

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

\*serghpl@mail.ioffe.ru

Разработаны подходы для создания мощных одномодовых лазеров и линеек на их основе. Показано, что дизайны гетероструктур с двойной асимметрией обеспечивают наибольшую устойчивость одномодового режима генерации. С использованием технологии МОС-гидридной эпитаксии разработаны гетероструктуры с низкими оптическими потерями. Продемонстрированы одиночные полупроводниковые лазеры, работающие в одномодовом режиме до 500мВт и маломодовом режиме до 2Вт. Продемонстрированы линейки одномодовых лазеров с непрерывной мощностью 5Вт и импульсной мощностью 25Вт с Гауссовым распределением в дальней зоне.

В последние годы существенно возросли требования к качеству модовой структуры мощных полупроводниковых лазеров. В первую очередь это обусловлено активно развивающимися направлениями практического использования, где качество излучения является критически важным: прецизионная дальнометрия, обработка материалов, квантовые стандарты частоты и др. Поэтому проблема повышения качества модовой структуры излучения является одной из основных в области физики мощных полупроводниковых лазеров. Если поперечный волновод задается дизайном полупроводниковой гетероструктуры и обеспечивает устойчивую одномодовую работу, то в стандартных конструкциях латеральный волновод мощных полупроводниковых лазеров может удерживать десятки различных мод, а его свойства заметно меняются в широком диапазоне токов накачки.

Для решения задачи создания мощного источника лазерного излучения с высоким качеством модовой структуры была проведена работа, включающая три основных этапа (1) теоретические исследования, связанные с разработкой концепции дизайна гетероструктуры и конструкции латерального волновода, обеспечивающей устойчивую одномодовую генерацию, (2) разработка МОС-гидридной технологии создания InGaAs/AlGaAs/GaAs полупроводниковых гетероструктур с низкими оптическими потерями, а мезаполосковых волноводов и решеток на их основе (3) экспериментальные исследования статических и динамических характеристик лазерных источников в широком диапазоне токов накачки.

Было исследовано три типовых дизайна гетероструктур: симметричная с узким волноводом, с асимметричным положением активной области и с двойной асимметрией. Установлено, что третий тип структур обеспечивает максимальную устойчивость в одномодовом режиме генерации для латерального волновода мезаполосковой конструкции, что связано с особенностями распространения мод высшего порядка. Разработанная технология МОС-гидридной эпитаксии InGaAs/AlGaAs/GaAs гетероструктур с двойной асимметрией позволила реализовать условия для получения внутренних оптических потерь  $0.4\text{см}^{-1}$  для лазеров в спектральном диапазоне 1050-1070нм. На основе разработанных гетероструктур продемонстрированы мезаполосковые волноводные конструкции, обеспечивающие условия для генерации непрерывной мощности в одномодовом режиме до 500мВт и маломодовом режиме до 2Вт для одиночных полупроводниковых лазеров.

Продемонстрировано решение проблемы многомодовых латеральных волноводов мощных полупроводниковых лазеров, основанное на использовании линеек мощных одномодовых лазеров. Рассмотрены подходы по созданию линеек одномодовых лазеров с различной силой оптической связи между элементами. Исследованная динамика дальнего поля показала, что уширение поля в области сверхвысоких токов накачки связано с эффектом увода луча (beam steering). В структурах с сильной оптической связью между элементами продемонстрированы режимы генерации супер мод, характеризующиеся динамической нестабильностью в нс-масштабе времени. На примере 10-ти элементных конструкций линеек со слабой оптической связью продемонстрированы

возможности генерации непрерывной мощности 5Вт и импульсной мощности 25Вт при сохранении стабильного латерального поля 8-110 с Гауссовым распределением в дальней зоне.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-30072).

# Светоизлучающие структуры на основе пространственно упорядоченных GeSi квантовых точек, встроенных в фотонные кристаллы

Ж.В. Смагина<sup>1,\*</sup>, М.В. Степихова<sup>2</sup>, В.А. Зиновьев<sup>1</sup>, А.В. Перетокин<sup>2,3</sup>, С.А. Дьяков<sup>4</sup>,  
Е.Е. Родякина<sup>1,5</sup>, А.В. Новиков<sup>2,3</sup>, А.В. Двуреческий<sup>1,5</sup>

1 Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия.

2 Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, 603087, Россия.

3 Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022, Россия.

4 Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, 30, Москва, 121205, Россия.

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

\*smagina@isp.nsc.ru

Исследованы люминесцентные свойства структур с GeSi квантовыми точками (КТ), в которых периодический массив глубоких ямок, созданный на подложке «кремний-на-изоляторе», использовался, как для роста пространственно упорядоченных КТ, так и для формирования фотонного кристалла. Показано, что при определенных параметрах ямок наблюдается существенное усиление интенсивности сигнала фотолюминесценции КТ на определенных длинах волн, обусловленное взаимодействием излучением КТ с модами фотонного кристалла. Данное увеличение интенсивности сигнала фотолюминесценции сохраняется вплоть до комнатной температуры.

## Введение

В последние годы значительно вырос интерес к исследованию взаимодействия излучения квантовых точек (КТ) с различными модами фотонного кристалла (ФК). Для обеспечения наиболее эффективного взаимодействия КТ с модами ФК важно задать определенное пространственное расположение КТ внутри ФК. Стандартным в этом случае является двухэтапный подход, когда на первом этапе формируется массив пространственно упорядоченных КТ, а на втором — ФК с контролируемым совмещением расположения КТ относительно отверстий ФК [1,2]. Данный подход достаточно хорошо исследован и развиты методы пространственного позиционирования одиночных КТ на структурированной поверхности подложки. В рамках указанного подхода авторами работы ранее было показано, что встраивание массива упорядоченных одиночных и групп GeSi КТ в ФК приводит к увеличению интенсивности их сигнала фотолюминесценции (ФЛ) в 30 раз по сравнению со структурами с упорядоченными массивами КТ без ФК [3]. Наблюдаемое усиление интенсивности связывается с взаимодействием излучения КТ с радиационными модами ФК.

В настоящей работе представлен новый подход к встраиванию GeSi КТ в двумерные фотонные кри-

сталлы. Такой подход позволяет использовать одну и ту же подложку "кремний-на-изоляторе" (КНИ) с предварительно созданными глубокими ямками (отверстиями) как для роста пространственно упорядоченных КТ, так и для формирования фотонного кристалла [4]. В рамках этого подхода для обеспечения эффективного взаимодействия излучения КТ с модами ФК требуется выполнение двух условий. Во-первых, необходимо реализовать зарождение КТ между ямками или по их периметру. Во-вторых, период расположения ямок, их глубина и форма после эпитаксиального роста КТ должны обеспечивать формирование двумерного ФК, имеющего моды в спектральном диапазоне излучения упорядоченных КТ. В работе представлены результаты исследований люминесцентных свойств пространственно упорядоченных GeSi КТ, сформированных вокруг отверстий, образующих ФК, в зависимости от параметров этих отверстий (диаметр отверстий и период их расположений).

## Методика эксперимента

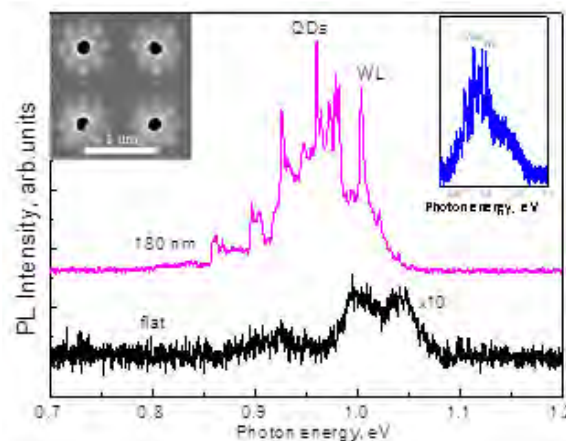
Для создания структур с пространственно упорядоченными GeSi КТ, встроенными в двумерные ФК, использовались КНИ подложки. С помощью электронной литографии и плазмохимического травления на подложках была создана структурированная



поверхность в виде двумерного массива ямок глубиной  $\sim 90$  нм, расположенных в узлах квадратной решётки. Ямки такой глубины могут быть использованы для контролируемого зарождения GeSi КТ между ямками или по их периметру [4, 5]. Ямки имели круглую форму диаметром от 60 до 190 нм и располагались в узлах квадратной решётки с периодами от 0.5 до 2 мкм. Формирование упорядоченных GeSi КТ на структурированной поверхности осуществлялось методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Детали роста структур с упорядоченными GeSi КТ описаны в работах [3-5]. Морфология поверхности исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Люминесцентные свойства массивов пространственно упорядоченных GeSi КТ, встроенных в двумерные ФК, исследовались методом микро-фотолюминесценции (ФЛ) с высоким пространственным и спектральным разрешением.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

На основе предложенного подхода были созданы структуры, в которых наблюдается существенное усиление интенсивности сигнала ФЛ GeSi КТ с характерными для ФК узкими пиками излучения, обусловленными взаимодействием излучения КТ с модами ФК (рис. 1). Исследования методом микро-ФЛ показали, что эффект усиления интенсивности ФЛ, связанный с взаимодействием излучения КТ с модами ФК, образованного ямками, для диаметров ямок в диапазоне 60–110 нм наблюдается при температурах не выше 77 К. Увеличение диаметра ямок до 180 нм [5], при тех же расстояниях между ямками, приводит к росту интенсивности сигнала ФЛ и наличию узких пиков даже при комнатной температуре. Проведённый теоретический анализ зонной структуры и излучательной способности мод ФК, образованного двумерной квадратной решёткой из ямок, позволяет заключить, что наблюдаемый в эксперименте эффект усиления интенсивности ФЛ связан с взаимодействием излучения активной среды с модами ФК [4].



**Рис. 1.** Спектры микро-ФЛ от массива упорядоченных GeSi КТ с расстоянием между ямками – 1 мкм, диаметр ямок – 180 нм. Спектры измерены при 77 К. flat - спектр микро-ФЛ от неструктурированной поверхности с КТ. На рисунке отмечено спектральное положение сигналов ФЛ от смачивающего слоя (WL) и КТ (QDs). На вставках СЭМ-изображение поверхности с упорядоченными GeSi КТ и спектр микро-ФЛ, полученный при комнатной температуре

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

Авторы выражают благодарность ЦКП "ВТАН" НГУ и ЦКП "Наноструктуры" ИФП СО РАН за предоставление измерительного оборудования. Люминесцентные исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН "Физика и технология микро- и наноструктур".

## Литература

1. M. Schatzl, F. Hackl, M. Glaser *et al.* // *ACS Photonics*. 4, 665 (2017).
2. R. Jannesari, M. Schatzl, F. Hackl *et al.* // *Opt. Express*. 21, 25426 (2014).
3. Ж.В. Смагина, А.В. Новиков, М.В. Степихова и др. // *ФТП*. 54, 708 (2020).
4. A.V. Novikov, Zh.V. Smagina, M.V. Stepikhova *et al.* // *Nanomaterials*. 11, №4, 909 (2021).
5. Ж.В. Смагина, В.А. Зиновьев, М.В. Степихова и др. // *ФТП*. 55, №12, 1210 (2021).

# Перестраиваемый синий сдвиг фотолюминесценции в нанотетраподах CdTe/CdSe

А.М. Смирнов<sup>1, 2, \*</sup>, В.Н. Манцевич<sup>1</sup>, Р.Б. Васильев<sup>3</sup>, В.С. Днепровский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ул. Ленинские Горы, 1-2, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Моховая 11-7, Москва, 125009.

<sup>3</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет наук о материалах, ул. Ленинские Горы, 1-73, Москва.

\*alsmir1988@mail.ru

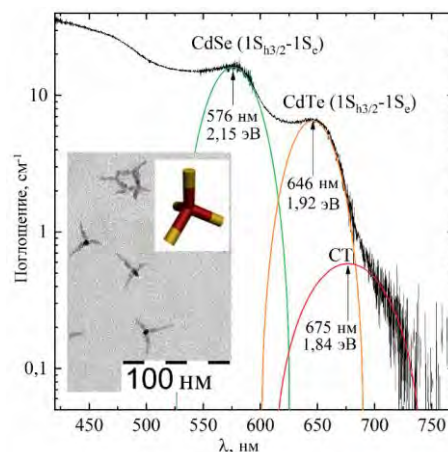
Изучены особенности фотолюминесценции (ФЛ) и поглощения при однофотонном возбуждении экситонов в нанокристаллах CdTe в форме тетраподов с наконечниками CdSe, выращенных избирательно на продолжениях ножек тетраподов. Впервые обнаружен гигантский синий сдвиг ( $\approx 129$  мэВ) линии ФЛ, связанной с непрямым переходом, в наноразмерной донорно-акцепторной структуре при увеличении интенсивности возбуждения. Наряду с перестраиваемой по длине волны линией ФЛ исследованы зависимости интенсивностей линий ФЛ компонент CdTe и CdSe нанотетраподов, относящиеся к прямым электронно-дырочным переходам, в зависимости от интенсивности возбуждения. По спектрам дифференциального пропускания выявлено одновременное просветления экситонных переходов, относящихся к различным структурным компонентам нанокристаллов.

Линейное поглощения коллоидного раствора нанотетраподов CdTe/CdSe характеризуется двумя хорошо разрешенными максимумами на длинах волн 576 нм и 646 нм (Рисунок 1), соответствующими основным экситонным переходам ( $1S_{h3/2}-1S_e$ ) в компонентах CdTe и CdSe гетероструктурных нанотетраподов. Дополнительная особенность в длинноволновой части спектра поглощения соответствует поглощению на непрямом экситонном переходе («charge-transfer» – СТ-состояния), который является типичным для гетероструктурных нанокристаллов CdTe/CdSe типа II. СТ-состояния достаточно слабо заметны в спектрах поглощения, однако была обнаружена хорошо разрешенная линия излучения в спектрах ФЛ исследуемых нанотетраподов в ближней инфракрасной спектральной области (Рисунок 2).

Образование интенсивной линии в спектре ФЛ в диапазоне длин волн от 650 нм до 850 нм связано с процессами излучательной рекомбинации СТ-состояний пространственно разделенных электронов и дырок, локализованных в компонентах CdTe и CdSe нанокристаллов (Рисунок 2).

ФЛ СТ-состояний определяется процессами рекомбинации через границу раздела компонент CdTe и CdSe и связана с рекомбинацией электронов, находящихся на уровне  $1S_e$  в ножках CdTe и дырками, находящимися на уровне  $1S_{h3/2}$  в наконечниках CdSe. Два максимума в спектрах ФЛ на длинах волн 595 нм и 677 нм появляются при умеренных интенсивностях возбуждения и соответствуют излучательной

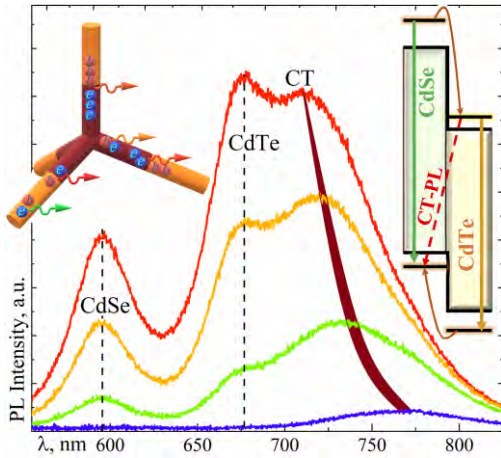
рекомбинации на прямых экситонных переходах  $1S_{h3/2}-1S_e$  в компонентах CdSe и CdTe, соответственно.



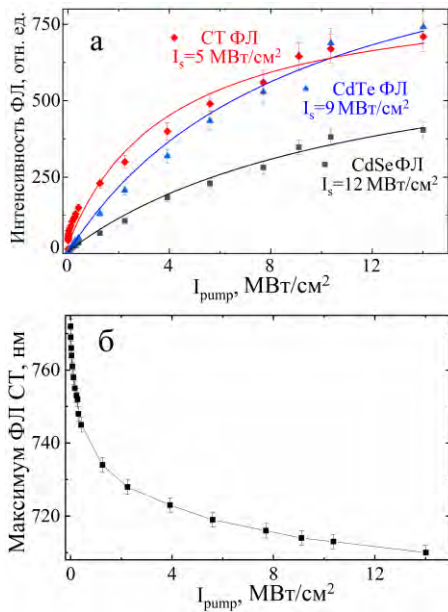
**Рис. 1.** Линейный спектр поглощения нанотетраподов CdTe/CdSe. Зоны с гауссовым распределением плотности заряда соответствуют экситонному поглощению компонент CdSe и CdTe (зеленые и желтые линии, соответственно) и поглощению СТ-состояний (красная линия). На вставке: ПЭМ-изображение нанотетраподов CdTe/CdSe и его схематичное изображение (красным цветом обозначено ядро и ножки CdTe, желтым цветом – наконечники CdSe)

Обнаруженное насыщение интенсивности ФЛ СТ-состояний происходит при более низких значениях интенсивности накачки ( $I_s \approx 5$  MW/cm<sup>2</sup>), чем насыщение интенсивности экситонной фотолюминесценции в компоненте CdSe  $I_s \approx 12 \pm 1,5$  MW/cm<sup>2</sup> и в компоненте CdTe  $I_s \approx 9 \pm 1,5$  MW/cm<sup>2</sup> (Рисунок 3), что связано с различными временами

жизни излучательной рекомбинации СТ-состояний (~ 0,4-0,7 мкс [1]) и экситонной ФЛ в доменах CdSe и CdTe (~ 0,02-0,04 мкс [1,2]).



**Рис. 2.** Спектры ФЛ нанотетраподов CdTe/CdSe при различной интенсивности накачки. На вставке слева представлено схематическое изображение нанотетрапода, справа – схема уровней нанотетрапода с обозначением каналов излучательной рекомбинации



**Рис. 3.** а) Зависимость интенсивности максимумов ФЛ от интенсивности накачки. Красная линия и ромбы соответствуют ФЛ СТ-состояний; синяя линия и треугольники соответствуют экситонной ФЛ в компоненте CdTe; черная линия и квадраты соответствуют экситонной ФЛ в компоненте CdSe. б) Зависимость длины волны максимума ФЛ СТ-состояний от интенсивности накачки

Скорость релаксации возбужденных экситонов в исследуемых тетраподных нано-гетероструктурах типа-II определяется несколькими процессами – прямой релаксацией экситонов в компонентах CdSe

и CdTe, рекомбинацией пространственно разделённых зарядов (ФЛ СТ-состояний) и Оже рекомбинацией, протекающей при высоких интенсивностях возбуждения. Насыщение ФЛ может быть связано с эффектом заполнения состояний и ограничиваться процессами Оже рекомбинации экситонов при высоких интенсивностях накачки.

Важной особенностью измеренных спектров ФЛ стал значительный синий сдвиг максимума фотолюминесценции СТ-состояний ( $\Delta\lambda = 57\pm 1$  нм или  $\Delta E = 129\pm 5$  мэВ) с ростом интенсивности возбуждения, сопровождающийся выходом на постоянное значение [3] (Рисунок 3б).

Стоит отметить, что при низких температурах ( $T < 2$ К) подобная особенность, связанная с перестраиваемыми люминесцентными процессами через непрямой переход, была ранее обнаружена в легированных сверхрешётках на основе GaAs. Данное явление было связано с контролируемым сдвигом люминесценции через непрямой оптический переход и было объяснено с помощью простой модели, основанной на классической оценке кинетики релаксации фотовозбужденных носителей в  $k$ -пространстве и реальном пространстве [4]. В нашем случае стоит поподробнее остановиться на понятии экситонов и вспомнить особенности экситонов в низкоразмерных структурах, энергия связи которых многократно увеличивается по сравнению с объемными материалами и позволяет им существовать при комнатных температурах. Говоря об экситонах в одномерных наноструктурах, коими можно представить отростки тетраподных гетероструктур, основное состояние экситона коллапсирует до нулевого радиуса и бесконечной энергии связи [5]. Для реальной квантовой нити с малым диаметром энергия связи увеличивается, а эффективный радиус экситонов вдоль нити уменьшается. При низких интенсивностях возбуждения, то есть для случая, когда количество поглощенных нанотетраподом фотонов не превышает одного фотона на каждую ножку тетрапода, радиус локализации одномерного экситона и энергию связи экситона можно записать следующим образом [5]:

$$a_{exc}^{1D} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{a_{exc}^{3D} d^2}, \tag{ф1}$$

$$E_{exc}^{1D} = \frac{e^2}{\sqrt{\epsilon_s \epsilon_l} d} \sqrt{2 \log \frac{\epsilon_s}{\epsilon_l}}, \tag{ф2}$$

где  $a_{exc}^{3D}$  - радиус экситона в объемном полупроводнике,  $d$  - диаметр ножки тетрапода,  $e$  - заряд электрона

трона,  $\epsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника и  $\epsilon_l$  - диэлектрическая проницаемость изолятора, окружающего полупроводниковую наноструктуру. Радиус экситона  $a_{ex}^{1D}$  в исследуемой наногетероструктуре был оценен  $a_{ex}^{1D} \approx 1,4$  нм с энергией связи  $E_{exc}^{1D} \approx 0,13$  eV при низкой плотности экситонов.

Обнаруженный сдвиг ФЛ СТ-состояний практически совпал с оценочным значением энергии связи экситонов в нанотетраподах. Таким образом, был сделан вывод, что радиус экситона увеличивается с ростом плотности экситонов в нанотетрапоре до тех пор, пока электрон и дырка практически перестают быть связанной частицей, тем самым увеличивая энергию испускаемых фотонов СТ-состояний.

Результатом увеличения интенсивности возбуждения является рост плотности экситонов в каждом нанотетрапоре, что приводит к заполнению фазового пространства экситонов, сопровождающемуся ростом радиуса экситона. Это приводит к просветлению на длине волны экситонных переходов и значительному синему сдвигу ФЛ СТ-состояний. При увеличении числа экситонов на нанотетрапоре существует два конкурирующих процесса, ответственных за связывание электрона и дырки. Электрон и дырка притягиваются, образуя экситон, но при этом, кулоновское отталкивание между парами электрон-электрон и дырка-дырка противодействует образованию экситона. Таким образом, увеличение количества экситонов в каждом нанотетрапоре приводит к равновесному распределению заряда вдоль отростков и увеличению радиуса экситона и соответственно уменьшению энергии экситона вплоть до

образования свободных электронов и дырок. Энергия связи экситонов уменьшается примерно с 0,13 эВ до 0,01 эВ, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Измеренная тенденция стремления максимума длины волны ФЛ СТ-состояний к постоянному значению с ростом интенсивности возбуждения (Рисунок 3б) непосредственно может свидетельствовать об образовании свободных электронов и дырок в нанотетраподах. Их энергия связи стремится к нулю для высокой плотности возбужденных носителей в нанокристаллах. Важно отметить, что, как и положение максимума ФЛ СТ-состояний, так и величина зависящего от накачки синего сдвига могут изменяться варьированием диаметра ножек нанотетрапоров.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда 18-72-1002 и гранта Президента для молодых ученых МД-781.2021.1.

## Литература

1. S. Kumar, M. Jones, S.S. Lo *et al.* // *Small*, V 3, 1633-1639 (2007).
2. P. Peng, D. J. Milliron, S. M. Hughes *et al.* // *Nano Letters*, V. 5, 1809-1813 (2005).
3. A.D. Golinskaya, A.M. Smirnov, M.V. Kozlova *et al.* // *Results in Physics*, V. 27, 104488 (2021).
4. H. Jung, H. Künzel, G.H. Döhler *et al.* // *Journal of applied physics*, V. 54, 6965-6973 (1983).
5. L. Keldysh // *physica status solidi (a)*, V. 164, 3-12. (1997).

# Магнетотранспорт пленок топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута

Н.П. Степина<sup>1,\*</sup>, В.А. Голяшов<sup>1</sup>, А.В. Ненашев<sup>1</sup>, О.Е. Терещенко<sup>1,4</sup>,  
А.О. Баженов<sup>1,4</sup>, Е.С. Коптев<sup>1</sup>, К.А. Кох<sup>2,3</sup>, Е.С. Голдырева<sup>2,3</sup>,  
И.В. Антонова<sup>1</sup>, М.Г. Рыбин<sup>5</sup>, Е.Д. Образцова<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, пр.ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090.

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Пирогова 30, Новосибирск, 630090.

<sup>4</sup> Институт общей физики им Прохорова РАН, ул. Вавилова 38 Москва, 119991

\*nstepina@mail.ru

Исследованы магнето-транспортные свойства пленок топологического изолятора (ТИ)  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , выращенных на графене методом газофазного транспорта. Показано, что несмотря на то, что в проводимости доминирует вклад объема, магнетосопротивление определяется как объемными, так и поверхностными состояниями. Вклад топологических поверхностных состояний структуры  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{графен}/\text{ТИ}$  проявляется в эффекте слабой антилокализации (САЛ). При уменьшении толщины пленки наблюдается переход от режима САЛ к режиму слабой локализации. Для объяснения экспериментальных данных предложена модель, основанная на зависимости вклада САЛ от разных поверхностей при разной толщине пленки от изгиба зон на границах графен/ТИ и ТИ/воздух.

## Введение

Топологические поверхностные состояния трехмерных топологических изоляторов (3D ТИ), защищенные симметрией обращения времени, характеризуются линейной дисперсией энергетических зон (дираковским конусом) с геликоидальной спиновой текстурой [1,2]. Это своеобразное состояние поверхности является следствием сопряжения ТИ с обычным изолятором, включая вакуум. Благодаря сильному спин-орбитальному взаимодействию и его следствиям, свойства ТИ оказываются весьма привлекательными с точки зрения практических приложений, в частности, для спинтроники, которая обещает произвести революцию в электронике и вычислительной технике, используя спин электрона в дополнение к его заряду. Основная проблема использования ТИ заключается в высокой объемной проводимости, что делает сложным выделение вклада поверхностных топологических состояний от объемных.

В данной работе проведено исследование проводимости и магнетосопротивления в пленках  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , выращенных на графене. Использование графена позволяет ожидать формирование структурно совершенной гетерограницы ТИ/графен, а также возможное изменение магнетотранспортных свойств структур из-за эффекта близости ТИ и графена.

## Экспериментальные результаты

Пленки  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  выращивались при температуре порядка  $500^\circ\text{C}$  методом газофазного осаждения на CVD графен, перенесенный на структуру  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ . Чтобы оценить роль графена в свойствах полученных структур, аналогичные пленки ТИ осаждались на слюду.

Схема реактора для роста пленок ТИ приведена на рис.1. Структура и толщина пленок исследовалась методом атомно-силовой микроскопии.

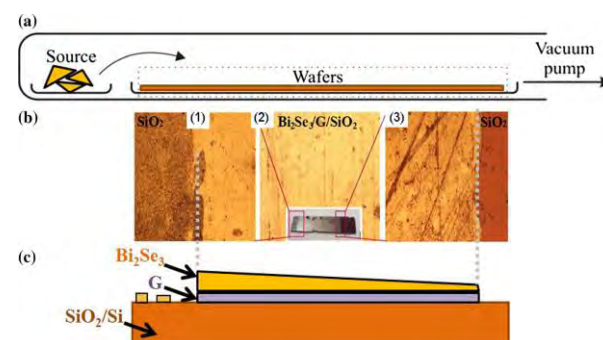
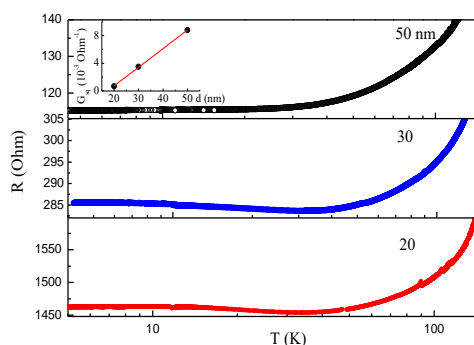


Рис. 1. Схема реактора для роста пленок ТИ

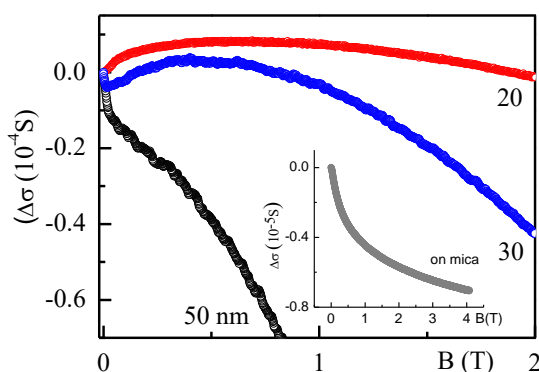
На рис.2 показаны температурные зависимости проводимости для трех пленок  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  разной толщины (20, 30, 50 нм), выращенных на графене.





**Рис. 2.** Температурные зависимости проводимости пленок  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  разной толщины, выращенных на графене

Вставка на рис.2 демонстрирует линейную зависимость проводимости от толщины пленки, что указывает на преимущественный вклад объемных состояний в общую проводимость системы.



**Рис. 3.** Магнетопроводимость пленок  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  разной толщины, выращенных на графене. Врезка - МП для пленки, выращенной на слюде

На рисунке 3 показаны данные магнетопроводимости (МП) для рассматриваемых пленок, выращенных на графене. Видно, что при уменьшении толщины пленки происходит переход от эффекта слабой антилокализации (САЛ), типичной для транс-

порта через поверхностные состояния трехмерного ТИ, к эффекту слабой локализации (СЛ).

Анализ кривых МП с помощью двух функций Хиками [3] для САЛ и СЛ позволил оценить характерные параметры магнетотранспорта, длины фазовой когерентности  $L_i$  и параметр  $\alpha_i$ , типично равный 1 для СЛ и  $-1/2$  для САЛ в случае проводимости по одному каналу. Для режима САЛ образцов с толщинами 50 и 30 нм получены близкие значения  $L_i$  (0.46 и 0.51 мкм соответственно), тогда как  $\alpha_i$  оказалось порядка 1 для пленки толщиной 50 нм и  $1/2$  для пленки толщиной 30 нм. Это показатель того, что в пленке с толщиной 50 нм эффект САЛ определяют 2 канала проводимости, тогда как САЛ для пленки с толщиной 30 нм определяется одним каналом. На врезке к рис.3 демонстрируется МП пленки ТИ, по толщине близкой к 50 нм, но выращенной на слюде. Более широкий пик отрицательной МП свидетельствует о меньшем значении длины фазовой когерентности. И действительно, анализ МП пленки, выращенной на слюде, дает  $L_i \sim 0.1$  мкм и  $\alpha_i \sim 1/2$ , характерную для одного канала проводимости.

Переход от режима САЛ к режиму СЛ наблюдался в пленках трехмерных ТИ [4], когда толщина уменьшалась от 5 до 3 квинтислоев. Результаты объяснялись гибридизацией состояний на двух поверхностях при уменьшении толщины. В нашем случае толщины пленок намного превышают рассмотренные в работе [4].

Для объяснения экспериментальных данных предложена модель, основанная на зависимости вклада САЛ от разных поверхностей при разной толщине пленки от изгиба зон на границах графен/ТИ и ТИ/воздух.

## Литература

1. B.A. Bernevig, S.C. Zhang, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 106802.
2. L. Fu, C.L. Kane, Phys. Rev. B 76 (2007) 045302.

3. S. Hikami, A. Larkin, Y. Nagaoka, Progr. Theoret. Phys. 63 (1980) 707.
4. M. Lang, L. He, X. Kou, P. Upadhyaya, Y. Fan, H. Chu, et al., Nano Lett. 13 (2013) 48.



# Резонансные явления в люминесцентном отклике одиночных цилиндрических резонаторов и их цепочек, сформированных на кремниевых структурах с nanoостровками Ge(Si)

М.В. Степихова<sup>1\*</sup>, В.А. Вербус<sup>1,2</sup>, К.В. Барышникова<sup>3</sup>, М.И. Петров<sup>3</sup>, V.V. Rutckaia<sup>4</sup>, А.В. Перетокин<sup>5</sup>, Д.В. Юрасов<sup>1</sup>, Д.В. Шенгуров<sup>1</sup>, А.В. Новиков<sup>1,5</sup>

1 Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский р-он, Нижегородская обл., 603087.

2 НИУ "Высшая школа экономики", Сортовское шоссе, д. 30, Нижний Новгород 603014.

3 Университет ИТМО, Биржевая линия В.О., 14, Санкт-Петербург, 199034.

4 Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Karl-Freiherr-von-Fritsch Str., 3, Halle (Saale), Germany 06120.

5 ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 27, Нижний Новгород, 603022.

\*mst@ipmras.ru

В работе обсуждаются резонансные явления, наблюдаемые в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) одиночных цилиндрических резонаторов и их цепочек, сформированных на кремниевых структурах с nanoостровками Ge(Si). Показана возможность усиления сигнала ФЛ nanoостровков в таких структурах более чем на порядок величины.

## Введение

В работе обсуждаются резонансные явления, наблюдаемые в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) одиночных дисковых резонаторов и их цепочек, сформированных на кремниевых структурах с nanoостровками Ge(Si). Интерес к таким структурам обусловлен, прежде всего, возможностями создания на их основе эффективных источников излучения, совместимых с технологией СБИС. Идея развития низкоразмерных резонаторов в данном случае обусловлена перспективами управления оптическими и излучательными свойствами кремниевых материалов, поисками возможностей увеличения их излучательной эффективности.

## Образцы и методы исследований

Одиночные резонаторы, представленные цилиндрами нанометрового размера, и их цепочки формировались на структурах, содержащих 10 слоев nanoостровков Ge(Si), выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках SOI. Суммарная толщина структур над слоем окисла составляла 630 и 680 нм. Резонаторы формировались методом электронно-лучевой литографии в сочетании с плазмохимическим травлением. Были получены одиночные резонаторы с диаметрами от 340 до 1475 нм, а также цепочки резонаторов мало-

го диаметра (340 – 500 нм) с числом резонаторов в цепочке от 2 до 11. Расстояние между резонаторами в цепочке составляло 50 нм.

Полученные резонаторы исследовались методом микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) в стандартной геометрии нормального падения возбуждающего и детектируемого лучей, при комнатной температуре. Сигнал ФЛ возбуждался твердотельным лазером на длине волны 532 нм.

Для прецизионной фокусировки лазерного луча в работе использовался объектив Mitutoyo M Plan Apo NIR с 50-ти кратным увеличением, обеспечивающий возможность фокусировки лазерного луча в пятно диаметром  $\sim 2$  мкм. Спектральные измерения (с разрешением до  $1 \text{ см}^{-1}$ ) проводились на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR. Сигнал ФЛ регистрировался охлаждаемым Ge фотодетектором.

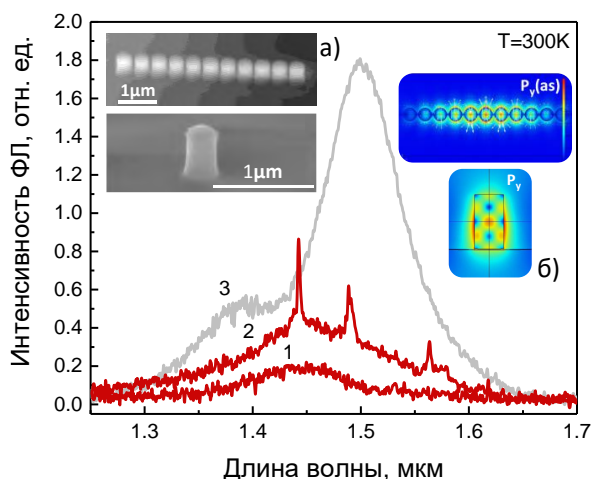
Приводимые далее теоретические расчеты были получены методом конечно-разностных элементов (FEM) с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics.

## Результаты и обсуждение

Рассматривая цилиндрические резонаторы, следует различать резонаторы малого (сравнимого с длиной

волны излучения) и большого (существенно больше длины волны излучения) диаметра.

Результаты исследований полученных резонаторов с нанопстровками Ge(Si) показывают, что преимущественную роль в резонаторах малого диаметра (от 340 до 500 нм, в нашем случае) играют электрон-дипольные и магнито-дипольные резонансы Ми, проявляющиеся в уширенных спектрах ФЛ, интенсивность которых слабее интенсивности сигнала ФЛ, измеряемой в непроцессированной области образца. В качестве примера, на рисунке 1 приведен спектр ФЛ резонатора диаметром 380 нм. Как видно из рисунка, интенсивность сигнала ФЛ такого резонатора примерно в 4 раза слабее интенсивности сигнала ФЛ, наблюдаемого в непроцессированной области. Однако, здесь следует иметь в виду, что возбуждаемый объем в непроцессированной области образца примерно в 28 раз больше возбуждаемого объема резонатора, что фактически свидетельствует об усилении сигнала в резонаторе.

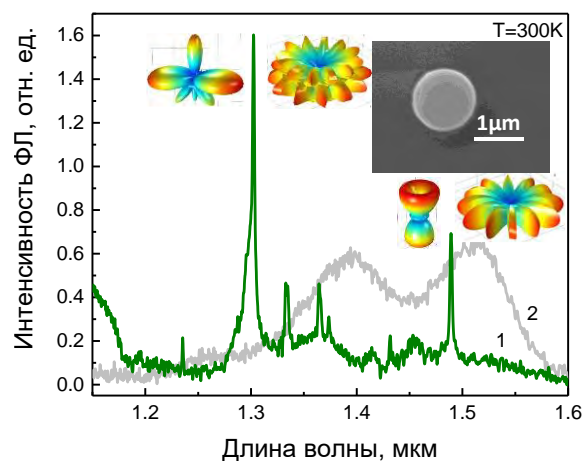


**Рис. 1.** Спектры ФЛ одиночного Ми резонатора диаметром 380 нм (1) и цепочки, состоящей из 11 резонаторов того же диаметра, с расстоянием между ними 50 нм (2). Светло-серым цветом на рисунке приведен спектр ФЛ, измеренный в непроцессированной области образца (3). На вставке показаны: а) - СЭМ снимки одиночного резонатора и цепочки резонаторов, и б) - результаты теоретических расчетов, демонстрирующих распределение электрического поля основной Ми моды, вносящей вклад в сигнал ФЛ одиночного резонатора (электрический дипольный резонанс) и коллективной моды, вносящей вклад в сигнал ФЛ цепочек резонаторов

Другой особенностью резонаторов малого размера является возможность наблюдения в цепочках таких резонаторов коллективных мод, добротность

которых пропорциональна кубу числа резонаторов в цепочке [1]. Интенсивность сигнала ФЛ в данном случае оказывается сравнимой (на длине волны резонанса) и даже превышает сигнал ФЛ в непроцессированной области образца (зависимости 2 и 3, рисунок 1).

Отличительной чертой резонаторов с диаметрами, значительно превышающими длину волны излучения является возможность наблюдения в них мод шепчущей галереи и резонансов связанных состояний в континууме (ВКС), являющихся следствием деструктивной интерференции мод Ми и Фабри-Перо [2]. Наблюдаемые резонансы ВКС характеризуются высокими значениями добротности и выделенной диаграммой направленности, ориентированной по оси цилиндра. Примечательно, что сигнал ФЛ в таких резонаторах может превышать сигнал ФЛ в непроцессированной области образца более чем на порядок величины (рисунок 2).



**Рис. 2.** Спектры ФЛ одиночного резонатора диаметром 1250 нм (2) и исходного, непроцессированного образца (1), измеренные в одинаковых условиях. На вставке показаны: СЭМ снимок исследованного резонатора и картины электрического поля в дальней зоне выделенных мод, совпадающих по своему спектральному положению с максимумами, наблюдаемыми в спектре ФЛ

Работа поддержана РФФИ (проект 20-52-12062 ННИО\_а).

## Литература

1. V. Rutckaia, F. Heyroth, G. Schmidt *et al.* // ACS Photonics, V. 8, 209 (2021).
2. A.A. Bogdanov, K.L. Koshelev, P.V. Kapitonova *et al.* // Advanced Photonics, V. 1(1), 016001 (2019).

# Связанные состояния в континууме в люминесцентном отклике фотонных кристаллов с квадратной и гексагональной решетками отверстий, сформированных на структурах с nanoостровками Ge(Si)

М.В. Степихова<sup>1,\*</sup>, С.А. Дьяков<sup>2</sup>, А.Н. Яблонский<sup>1</sup>, А.В. Перетокин<sup>1,3</sup>, Д.В. Юрасов<sup>1</sup>, Ж.В. Смагина<sup>4</sup>, А.В. Новиков<sup>1,3</sup>, З.Ф. Красильник<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский район, Нижегородская обл. 603087.

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, ул. Нобеля, 3, Москва, 143005.

<sup>3</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022.

<sup>4</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*mst@im.ipmras.ru

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований двумерных фотонных кристаллов (ФК), сформированных на кремниевых структурах с самоформирующимися nanoостровками Ge(Si). В фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками отверстий проанализирован вклад в люминесцентный отклик мод разной природы, показана преимущественная роль связанных состояний в континууме в усилении сигнала фотолюминесценции.

## Введение

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований двумерных фотонных кристаллов (ФК), сформированных на кремниевых структурах с самоформирующимися nanoостровками Ge(Si). Интерес к таким структурам вызван, прежде всего, их излучательными свойствами в диапазоне длин волн 1.2-1.6 мкм, а также технологической совместимостью и простотой интегрирования в схемы современной микроэлектроники. Как будет показано далее, встраивание структур с nanoостровками Ge(Si) в фотонный кристалл обеспечивает возможности контролируемого управления их излучающими свойствами, а именно – усилением сигнала фотолюминесценции. Последнее обусловлено процессами взаимодействия nanoостровков Ge(Si) с выделенными модами ФК, где значительную роль играет взаимодействие с модами связанных состояний в континууме (VIC [1]), обеспечивающее максимальное усиление.

## Образцы и методы исследований

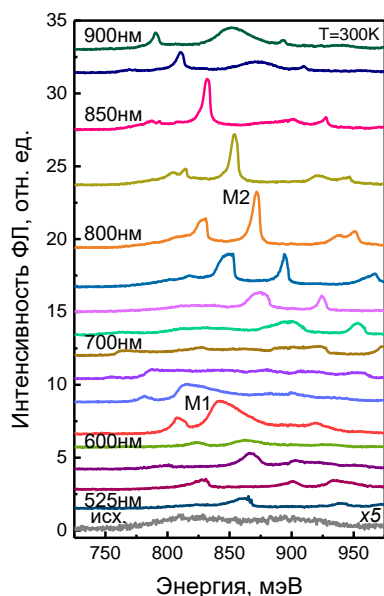
В работе исследовались ФК с квадратной и гексагональной решетками отверстий с периодами решетки ( $a$ ), варьируемыми от 525 до 1000 нм. Радиус отверстий ФК ( $r$ ) определялся соотношением  $r/a = 0.25$ . Толщина волноводного слоя, на котором форми-

ровался ФК, составляла 250 нм. Фотонные кристаллы формировались на структуре, выращенной на подложке SOI и содержащей 3 слоя nanoостровков Ge(Si). Для анализа люминесцентных свойств полученных ФК использовался стандартный метод микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) с фокусирующим объективом Mitutoyo M Plan APO NIR 10x ( $NA = 0.26$ ). Сигнал ФЛ возбуждался твердотельным лазером на длине волны 532 нм и детектировался охлаждаемым Ge фотодетектором, спектральное разрешение схемы обеспечивалось Фурье-спектрометром Bruker IFS 125 HR. Приводимые в работе теоретические расчеты зонных диаграмм ФК выполнялись Фурье-модальным методом в формализме матрицы рассеяния [2].

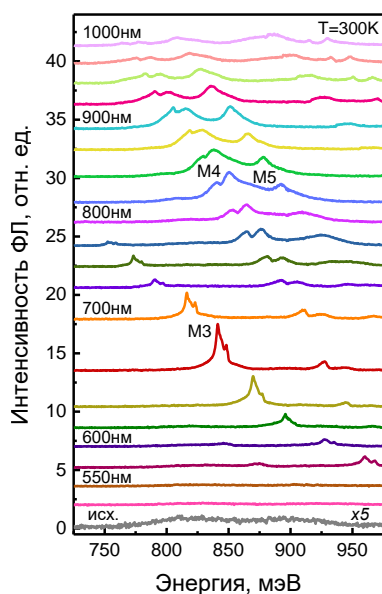
## Результаты и обсуждение

Результаты исследований ФК с квадратной и гексагональной решетками отверстий приведены на рисунках 1 и 2, соответственно. Как видно из рисунков, при совпадении спектра выделенных мод ФК с диапазоном энергий, в котором наблюдается излучение nanoостровков Ge(Si) (770 - 970 мэВ – нижние спектры на рисунках), наблюдается резкий рост сигнала ФЛ. Так, для фотонных кристаллов с квадратной решеткой отверстий наиболее значимый рост сигнала островков наблюдался в ФК с перио-

дами решетки 625 нм и 800 нм. Рост интенсивности сигнала в максимуме, по сравнению с сигналом, измеряемым в непроцессированной области образца, для этих ФК составил 15 и 27 раз, соответственно. Для ФК с гексагональной решеткой, значительный рост сигнала ФЛ наблюдался при несколько больших значениях периодов решетки - 675 нм и 825 нм (рисунок 2), рост интенсивности сигнала составил 27 и 19 раз, соответственно.



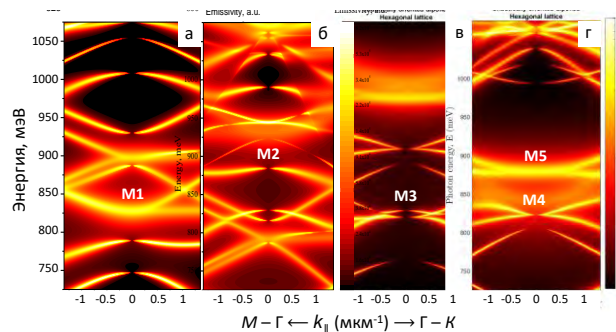
**Рис. 1.** Спектры микро-ФЛ фотонных кристаллов с квадратной решеткой отверстий с  $a = 525 \text{ нм} + 900 \text{ нм}$  (шаг изменения  $a$  - 25 нм). Нижний спектр на рисунке соответствует спектру, измеренному в непроцессированной области образца (спектр умножен на 5 для наглядности)



**Рис. 2.** Спектры микро-ФЛ фотонных кристаллов с гексагональной решеткой отверстий с  $a = 525 \text{ нм} + 1000 \text{ нм}$  (шаг изменения  $a$  - 25 нм). Нижний спектр на рисунке соответ-

ствует спектру, измеренному в непроцессированной области образца (спектр умножен на 5 для наглядности)

Проведенный анализ зонной структуры исследованных ФК позволил показать, что максимальный рост сигнала ФЛ в нашем случае обусловлен модами связанных состояний в континууме. Данные расчета зонных диаграмм ФК, для которых наблюдался максимальный рост сигнала ФЛ, приведены на рисунке 3, где соответственно указаны моды, вносящие основной вклад в сигнал ФЛ (моды M1-M5, см. также рисунки 1, 2). Выделенные моды по своей природе являются радиационными – моды M1, M5 и модами связанных состояний в континууме – моды M2, M3, M4. Последние претерпевают разрыв в  $\Gamma$  точке зоны Бриллюэна и характеризуются высокими значениями добротности. Действительно, можно экспериментально показать, что добротность этих мод, измеряемая в диапазоне малых углов сбора сигнала ФЛ, превышает  $10^3$ .



**Рис. 3.** Теоретически рассчитанные зонные диаграммы ФК с квадратной решеткой отверстий, с  $a = 625 \text{ нм}$  (а) и  $a = 800 \text{ нм}$  (б), и гексагональной решеткой отверстий с  $a = 675 \text{ нм}$  (в) и  $a = 825 \text{ нм}$  (г). M1-M5 – выделенные моды, для которых наблюдается максимальное усиление сигнала ФЛ (см. рис. 1,2)

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

## Литература

1. C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone *et al.* // Nature Reviews Materials, V. 1, 16048 (2016).
2. S.A. Dyakov, M.V. Stepikhova, A.A. Bogdanov *et al.* // Laser & Photonics Review, V. 15, 2000242 (2021).
3. S.G. Tikhodeev, A.L. Yablonskii, E.A. Muljarov, *et al.* // Physical Review B, V. 66, 045102 (2002).

# Особенности Рамановского рассеяния на гетероструктурах Ge/Si с низкотемпературными квантовыми точками Ge

М.С. Сторожевых<sup>1,\*</sup>, Л.В. Арапкина<sup>1</sup>, С.М. Новиков<sup>2</sup>, В.С. Волков<sup>2</sup>, А.В. Арсенин<sup>2</sup>, О.В. Уваров<sup>1</sup>, В.А. Юрьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991.

<sup>2</sup> Центр фотоники и двумерных материалов МФТИ, Институтский пер., 9, Долгопрудный, 141707.

\*storozhevykh@kapella.gpi.ru,

Исследовалось Рамановское рассеяние на гетероструктурах Ge/Si, содержащих 5 слоев Ge толщиной от 4 до 18 Å, выращенных методом МЛЭ при температуре 360 °С. В полученных спектрах обнаружены особенности, не коррелирующие с монотонным ростом толщины слоев Ge в образцах. Наблюдался аномальный рост пиков Ge–Ge и Si–Ge в образце с толщиной слоев Ge 10 Å, а также сильное смещение положения и уширение пика Si–Ge в образцах с толщиной слоев Ge 8 и 9 Å. На основании данных исследований методом СТМ структур с такой же толщиной напыляемого Ge, не покрытых Si, предложена модель, объясняющая особенности Рамановского рассеяния в исследуемых структурах. Эта модель основана на особенностях морфологии слоев и подкреплена численным моделированием.

## Введение

Рамановское рассеяние является одним из самых популярных методов исследования состава и напряжений в кристаллических структурах. Однако, интерпретация получаемых спектров зачастую требует дополнительных знаний об образце, полученных другими методами, либо теоретическими расчетами.

Гетероструктуры Ge/Si, содержащие самоорганизующиеся квантовые точки Ge, исследуемые в данной работе, являются кристаллическими структурами с очень тонкими слоями переменного состава, которые, в то же время, не являются плоскими и имеют сложную морфологию. Низкотемпературные квантовые точки Ge представляют собой пирамидальные кластеры высотой 6 - 12 Å с гранями {105}, содержащие ядро из чистого Ge, окруженное оболочкой смешанного состава Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub>. Квантовые точки расположены на смачивающем слое Ge, также не являющемся абсолютно плоским.

Исследование Рамановских спектров, проведенное в данной работе, показало неприменимость стандартного подхода, в котором интенсивность отклика пропорциональна количеству материала, к гетероструктурам со слоями, имеющими сложную морфологию.

## Методика эксперимента

Экспериментальные образцы выращивались методом МЛЭ на установке Riber SSC 2 на пластинах Si(001) КДБ-12 диаметром 50 мм. Предварительная обработка пластин включала в себя химическую обработку и отжиг в течение 6 часов при температуре 600 °С. Буферный слой Si толщиной 100 нм напылялся при T = 650 °С. Рост слоев Ge проводился при 360 °С. Разделительные слои Si толщиной 50 нм напылялись при T = 530 °С.

Для измерения Рамановских спектров использовался конфокальный сканирующий Рамановский микроскоп Horiba LabRAM HR Evolution. Длина волны возбуждающего лазера составляла 632.8 нм.

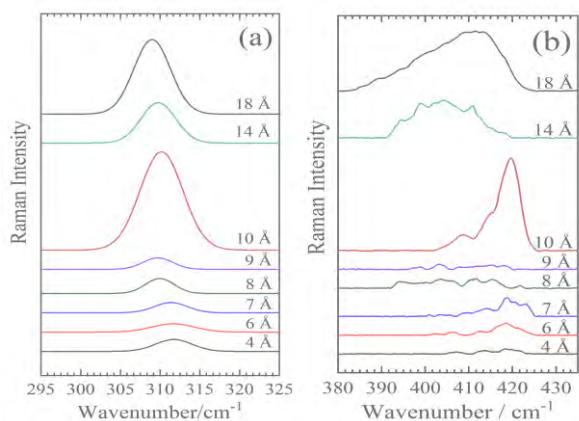
Измерения СТМ проводились на микроскопе STM GPI-300 UHV, совмещенном с ростовой камерой.

Численное моделирование Рамановского рассеяния в модельных структура Ge/Si проводилось в программном пакете BIOVIA Materials Studio.

## Результаты

На Рис. 1 представлены Рамановские спектры всех исследуемых образцов в областях колебательных мод Ge–Ge и Si–Ge.



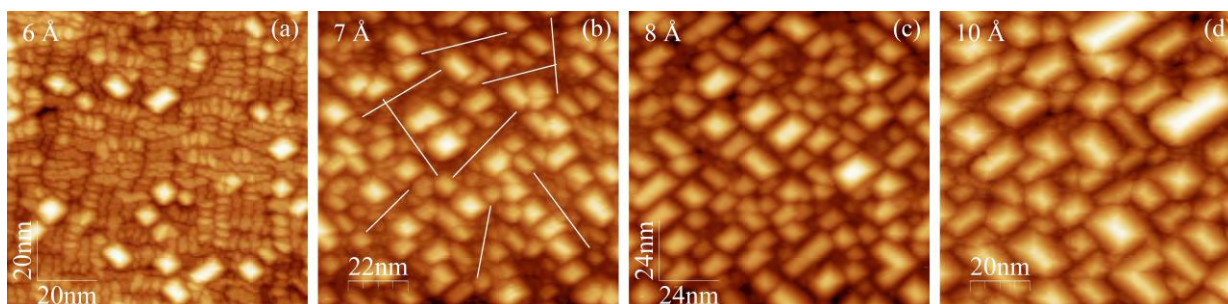


**Рис. 1.** Спектр Рамановского рассеяния в области колебательных мод Ge–Ge (a) и Si–Ge (b)

Области смешанного состава  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ , наблюдаемые в спектрах, возникают над слоем квантовых точек Ge в результате диффузии атомов Ge в Si с граней {105} квантовых точек [1]. В образце с толщиной слоев Ge 4 Å присутствуют лишь смачивающие слои Ge без квантовых точек, и наличие небольшого количества  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  обусловлено сегрегацией Ge в процессе напыления покрывающего слоя Si [2].

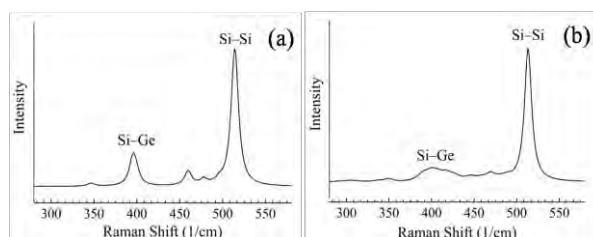
На полученных спектрах можно выделить аномальное уширение и смещение в область более коротких длин волн пика Si–Ge для образцов с толщиной Ge 8 и 9 Å. В рамках предлагаемой модели, это поведение объясняется отсутствием протяженных областей  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ , связанное с заполнением поверхности смачивающего слоя квантовыми точками. При такой морфологии  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  представляет собой ансамбль нанокластеров. При меньшей толщине Ge (4 - 7 Å) наличие протяженных областей  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  между квантовыми точками (Рис. 2) приводит к появлению более узкого пика Si–Ge.

Образец с толщиной Ge 10 Å демонстрирует резкое увеличение интенсивности Рамановского рассеяния как в области Ge–Ge, так и в области Si–Ge. Предположительно, это связано с формированием протяженной области  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  над слоем квантовых точек при толщине слоя Ge 10 Å, которое наблюдалось в работе [1]. Кроме того, при данной толщине Ge, квантовые точки также начинают срастаться своими основаниями, что приводит к увеличению толщины плоского слоя Ge.



**Рис. 2.** Изображения СТМ квантовых точек Ge при различной толщине напыляемого Ge. Белыми линиями на рисунке (b) показаны области смачивающего слоя, не занятого квантовыми точками

Численное моделирование Рамановского рассеяния проводилось для модельных структур, представляющих собой плоские слои SiGe и ансамбли нанокластеров SiGe в матрице Si. Результаты моделирования приведены на Рис. 3.



**Рис. 3.** Смоделированный спектр Рамановского рассеяния для структур Ge/Si с плоскими слоями SiGe (a) и ансамблем нанокластеров SiGe (b) в матрице Si

Результаты расчета подтверждают предположение о влиянии морфологии тонких слоев на спектр Рамановского рассеяния, при равном количестве материала.

## Литература

1. M.S. Storozhevyykh, L.V. Arapkina, S.M. Novikov, V.S. Volkov, O.V. Uvarov, V.A. Yuryev, *Semicond. Sci. Technol.*, 35, 045012 (2020).
2. P.C. Zalm, G.F. A. van de Walle, D.J. Gravesteijn, van A.A. Gorkum, *Appl. Phys. Lett.*, 55, 2520 (1989).



# Получение атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей топологических изоляторов $A^V B^VI$

А.С. Тарасов<sup>1\*</sup>, В.А. Голяшов<sup>1, 2</sup>, И.О. Ахундов<sup>1</sup>, Д.В. Ищенко<sup>1</sup>, А.С. Кожухов<sup>1</sup>,  
К.А. Кох<sup>3, 4</sup> О.Е. Терещенко<sup>1, 2</sup>

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

2 Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090

3 ИГМ СО РАН, 630090, пр. Академика Колтюга, 3, Новосибирск, 630090

4 Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово, 650000

\*tarasov1916@yandex.ru

В данной работе были получены атомарно-чистые и структурно-упорядоченные поверхности топологических изоляторов группы  $A^V B^VI$  ( $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_2Se_3$  и  $Sb_2Te_3$ ). Обнаружено, что обработка в безводном растворе HCl-iPA приводит к удалению собственных оксидов с поверхности соединений  $A^V B^VI$  и обогащению поверхности элементами VI группы (Te и Se). В дополнении на поверхности  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$  наблюдались хлориды V группы. Прогрев в сверхвысоком вакууме приводил к удалению избыточного Te и Se, а также хлоридов V группы. Показано, что атомная и электронная структура поверхностей, приготовленных с помощью химической обработки образцов, полученных сколом в вакууме, не отличались.

## Введение

Бинарные соединения  $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_2Se_3$  и  $Sb_2Te_3$  являются трехмерными (3D) топологическими изоляторами (ТИ), в которых наблюдаются спин-поляризованные поверхностные состояния с линейным законом дисперсии. Однако данные материалы обладают высокой объёмной проводимостью, что затрудняет изучение поверхностного транспорта. Для уменьшения проводимости используют тройные и четверные соединения  $(Bi_{1-x}Sb_x)_{1-z}(Te_{1-y}Se_y)_z$  (BSTS), смешивание которых позволяет получить удельное сопротивление до  $\rho = 12.6 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$  и уменьшить концентрацией носителей заряда до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  [1]. Одной из основных методик визуализации поверхностных состояний в ТИ является фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES). Однако для применения этого метода необходимо правильно приготовить поверхность, т.е. очистить её от собственных оксидов и углеродных загрязнений. Для образцов с ориентацией поверхности (0001) обычно используется методика скола в вакууме. Но для изучения поверхностей с другой ориентацией и тонких плёнок такая методика не подходит и нужно более технологичное решение. Для приготовления поверхности соединений  $A^III B^V$ ,  $A^IV B^VI$  и  $A^II B^VI$  успешно используется методика обработки в безводном растворе хлороводорода в изопропиловом спирте (HCl-iPA) и последующего прогрева в вакууме. Таким образом, целью данной работы является

проверка возможности применения данной методики для соединений  $A^V B^VI$ . Как первый шаг, нами были получены атомарно-чистые и структурно-упорядоченные поверхности бинарных соединений:  $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_2Se_3$  и  $Sb_2Te_3$ .

## Эксперимент

Объёмные кристаллы  $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_2Se_3$  и  $Sb_2Te_3$  были выращены с помощью метода Бриджмена [2]. Химическая обработка образцов производилась в несколько этапов: травление в безводном растворе HCl-iPA в течение 10 секунд и промывка в чистом изопропиловом спирте для удаления продуктов реакции. Образец, покрытый слоем изопропилового спирта, помещался в загрузочную камеру в течение минуты. Способ получения безводного раствора HCl-iPA подробно описан в работе [3].

Для фотоэмиссионных измерений использовалась установка SPECS GmbH, оборудованная анализатором энергии электронов ASTRAIOS 190 и детектором электронов 2D-CMOS. Для РФЭС-измерений использовалось монохроматизированное излучение Al K $\alpha$  ( $h\nu = 1486.7 \text{ eV}$ ), спектры записывались под нормальным углом и общее разрешение составляло 0.6 эВ.

Для ARPES-измерений использовалось излучение линии He I $\alpha$  с энергией 21.22 эВ.

## Результаты и обсуждение

На исходной поверхности образцов наблюдался слой собственных оксидов. Обработка в растворе HCl-iPA удаляла оксидный слой и приводила к обогащению поверхности элементами VI группы (Te и Se). В дополнении на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  наблюдались хлориды V группы. Прогрев  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  в сверхвысоком вакууме при температуре 170 °C приводил к десорбции слоя элементного Se и формированию атомарно-чистой и структурно-упорядоченной нереконструированной поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  (0001)-(1x1), а в спектрах ARPES наблюдался линейный закон  $E(k)$ , соответствующий закону дисперсии поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  (0001), полученной сколом в вакууме. Прогрев  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  в сверхвысоком вакууме при температуре 210 °C приводил к удалению избыточного слоя Te и хлоридов V группы, а также появлению атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (0001)-(1x1) и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (0001)-(1x1). ARPES-спектры, полученных таким способом образцов, были идентичны ARPES-спектрам образцов, поверхность которых была приготовлена с помощью скола в вакууме. Таким образом, разработана универсальная методика подготовки поверхности бинарных соединений  $\text{A}^{\text{V}}\text{B}^{\text{VI}}$ , которая применима для образцов любой толщины и поверхностной ориентации.

## Литература

1. Z. Ren et.al // Phys. Rev. B., V. 84, p. 165311 (2011).

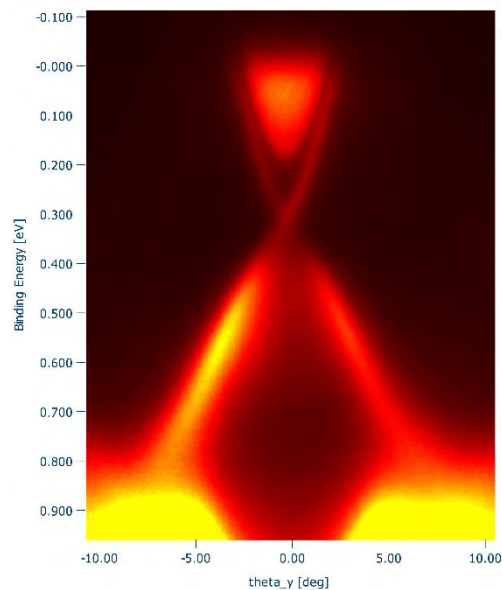


Рис. 1. Спектр ARPES образца  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  после обработки в растворе HCl-iPA и прогрева при температуре 170 °C.  $h\nu = 21,22$  эВ,  $T = 300$  К, в направлении Г–К

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта № 21-52-12024.

2. O.E. Tereshchenko et.al // JETP Lett., V. 94, p.465 (2011).
3. O.E. Tereshchenko et.al // J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film, V. 17, p.2655 (1999).

# Анализ нелинейных искажений DpHEMT структур на основе соединения GaAs/InGaAs с двусторонним дельта-легированием

Е.А. Тарасова<sup>1,\*</sup>, С.В. Хазанова<sup>1</sup>, О.Л. Голиков<sup>1</sup>, А.С. Пузанов<sup>1</sup>, С.В. Оболенский<sup>1</sup>, Н.Е. Кодочигов<sup>1</sup>, В.Е. Земляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина 23, 603600, Нижний Новгород.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Зеленоград

\* tarasova@rf.unn.ru

Работа посвящена особенностям моделирования электрофизических параметров DpHEMT структур на основе соединения AlGaAs/InGaAs/GaAs с помощью самосогласованного решения уравнения Шредингера и Пуассона. Описана методика экспериментального определения подвижности носителей заряда в слое двумерного электронного газа исследуемого DpHEMT. Предложен метод расчета интермодуляционных искажений.

## Введение

В настоящее время широко используются полевые транзисторы с каналом из слоя узкозонного полупроводника, формирующего квантовую яму, в которой образуется двумерный электронный газ (HEMT) [1]. Широко применяются структуры на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs. Для улучшения выходных параметров транзисторов подобного типа обычно используется  $\delta$ -легирование со стороны затвора транзистора. В работе [2] было показано, что добавление второго легирующего  $\delta$ -слоя в перспективных HEMT на основе GaAs со стороны подложки приводит к повышению линейности передаточной вольтамперной характеристики (ВАХ) и снижению уровня интермодуляционных искажений [2]. В работе [2] анализировалась зависимость нелинейности передаточной ВАХ транзистора от распределения электронов в канале транзистора, однако учет подвижности проводился по стандартной аналитической зависимости, что обусловило погрешность результатов расчета интермодуляционных искажений по стандартной методике [3]. В данной работе предлагается проводить расчет передаточных ВАХ с учетом экспериментально полученных данных о подвижности носителей заряда в исследуемом DpHEMT, а расчет интермодуляционных искажений с помощью более общего метода [4].

## Объект исследования

В работе проводится расчет параметров многосекционного DpHEMT на основе GaAs/In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As с двумя  $\delta$ -слоями с концентрацией примеси

$2.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $0.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Состав слоев приведен в таблице 1.

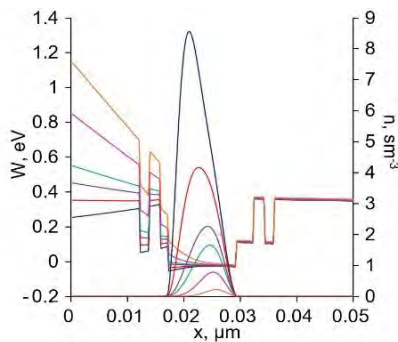
**Таблица 1.** Состав исследуемой структуры DpHEMT. Длина канала  $L_g = 0.15 \text{ мкм}$ , толщина канала  $W = 2 \text{ мкм}$ ,  $H$  – толщина слоя,  $N_d$  – концентрация легирующей примеси

Слой, легированный кремнием	$H, \text{ нм}$	$N_d, \text{ м}^{-3}$
Спейсерный слой GaAs	13	$5 \cdot 10^{22}$
$\delta$ -слой GaAs	0.4	-
Спейсерный слой GaAs	3	$2.4 \cdot 10^{25}$
Спейсерный слой Al <sub>0.23</sub> Ga <sub>0.77</sub> As	0.4	-
Спейсерный слой GaAs	2	-
Канальный слой In <sub>0.23</sub> Ga <sub>0.77</sub> As	15	-
Спейсерный слой GaAs	12	-
Спейсерный слой Al <sub>0.23</sub> Ga <sub>0.77</sub> As	3	-
Спейсерный слой GaAs	2	-
Спейсерный слой GaAs	0.4	-
$\delta$ -слой GaAs	3	$0.7 \cdot 10^{25}$
Спейсерный слой GaAs	0.4	-
Спейсерный слой Al <sub>0.23</sub> Ga <sub>0.77</sub> As	100	-
Буферная гетероструктура GaAs	440	-
Подложка	1000	-

## Результаты расчетов

Численный расчёт проводится путем решения стационарного одномерного одноэлектронного уравнения Шредингера, согласованного с уравнением Пуассона. Данная численная схема позволяет находить профили потенциала и уровни размерного квантования, используя как однородную, так и неоднородную координатную сетки. При этом можно плавно менять приложенное напряжение, концентрацию легирующей примеси и ряд других технологических параметров. В работе было получено се-

мейство зонных диаграмм и концентраций носителей заряда для различных значений электрического поля и легирующей примеси в исследуемой структуре (рисунок 1).



**Рис. 1** Результаты расчетов зонной диаграммы и профиля распределения электронов исследуемой структуры для приложенных напряжений  $U=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 0.9$  В

## Эксперимент

Для расчета ВАХ и дальнейшего анализа интермодуляционных искажений подвижность носителей заряда определялась экспериментально. На первом этапе из вольт-фарадных характеристик определялась концентрация носителей заряда согласно методике, описанной в работе [3]. На втором этапе измерялось сопротивление канала в диодном включении «сток-исток» при нулевом напряжении на затворе НЕМТ. В дальнейшем подвижность носителей заряда оценивалась как:  $\mu = l/e \cdot n \cdot R \cdot S$ , где  $l$  – длина канала,  $e$  – заряд электрона,  $n$  – концентрация носителей заряда в канале,  $R$  – сопротивление канала,  $S$  – площадь поперечного сечения канала. В результате расчетов было получено значение подвижности носителей заряда в двумерном электронном газе  $9300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

## Методика расчета интермодуляционных искажений

Для безинерционного усилителя связь между входом  $u_{in}(t)$  и выходом  $u_{out}(t)$  описывается в виде некоторой нечетной функции  $u_{out}(t) = g(u_{in}(t))$ , которая для анализа интермодуляционных искажений 3-го порядка обычно представляется в виде полиномиального разложения

$$u_{out}(t) \approx \alpha_1 u_{in}(t) + \alpha_2 u_{in}^2(t) + \alpha_3 u_{in}^3(t). \quad (1)$$

В этом случае амплитуда выходного сигнала на основной частоте сравняется с амплитудой выходных

продуктов интермодуляции 3-го порядка при амплитуде входного сигнала, равного [4]

$$A_{ИПЗ} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{|\alpha_1|}{|\alpha_3|}}. \quad (2)$$

В работе [5] предложен более общий подход к анализу интермодуляционных искажений через двойной ряд Фурье. Пусть  $A_s \cos \theta_s$  – полезный сигнал,  $A_i \cos \theta_i$  – помеха, где  $\theta_s = \omega_s t + \varphi_s$  и  $\theta_i = \omega_i t + \varphi_i$  – их полные фазы. Тогда  $u_{out}(t) = g(A_s \cos \theta_s + A_i \cos \theta_i)$  и

$$u_{out} = \sum_{k,l=0}^{\infty} g_{kl} \cos(k\theta_s) \cos(l\theta_i), \quad (3)$$

где  $g_{kl}$  – коэффициенты разложения, определяемые формулой

$$g_{kl} = \frac{\lambda_{kl}}{\pi^2} \int_{-\pi}^{+\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} g(A_s, A_i) \cos(k\theta_s) \cos(l\theta_i) d\theta_s d\theta_i, \quad (4)$$

$\lambda_{00} = 1/4$ ,  $\lambda_{k0} = \lambda_{0l} = 1/2$ , в остальных случаях  $\lambda_{kl} = 1$ .

Амплитуде полезного сигнала на выходе усилителя соответствует коэффициент  $g_{10}$ , а амплитуды интермодуляционных компонент 3-го порядка равны  $g_{kl}/2$  при  $k + l = 3$ . Таким образом,  $A_{ИПЗ}$  находится из решения уравнения  $2g_{10}(A_{ИПЗ}, A_{ИПЗ}) = g_{03}(A_{ИПЗ}, A_{ИПЗ}) + g_{12}(A_{ИПЗ}, A_{ИПЗ}) + g_{21}(A_{ИПЗ}, A_{ИПЗ}) + g_{30}(A_{ИПЗ}, A_{ИПЗ})$ .

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (FSWR-2021-011).

## Литература

1. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. - Вильнюс: Мокслас, 1989. – 264 с.
2. Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Хазанова С.В., Григорьева Н.Н., Голиков О.Л., Иванов А.Б., Пузанов А.С. // Физика и техника полупроводников. Т. 54. № 9. 2020. С. 968-973.
3. Тарасова Е.А., Оболенская Е.С., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Неженцев А.В., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Медведев Г.В. // Физика и техника полупроводников. Т. 50. № 12. 2016. С. 1599–1604.
4. B. Razavi. RF Microelectronics (Hamilton Printing Company in Castleton, N.Y., 2012).
5. Д.Н. Ивлев, В.А. Калинин // Известия вузов. Радиофизика, Т. 53, № 9-10, С. 658 (2010).

# Фотоэмиссионная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением в изучении квантовых материалов: возможности новой установки в ИФП СО РАН и ARPES станции на синхротронном источнике СКИФ

О.Е. Терещенко<sup>1,2,\*</sup>, В.А. Голяшов<sup>1,2</sup>, А.Д. Николенко<sup>2</sup>, А.В. Бухтияров<sup>2</sup>, Я.В. Зубавичус<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> ЦКП «СКИФ», ИК СО РАН, пр. Никольский, 1, Кольцово, 630559.

\*teresh@isp.nsc.ru

В работе обсуждаются перспективы развития метода фотоэмиссионной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением в России, экспериментальные возможности современных фотоэлектронных спектрометров и планы строительства станции 1-6-2 «Фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением» синхротрона «СКИФ».

## Введение

Развитие метода фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением (ФЭСУР, ARPES) открыло путь прямого измерения электронной структуры поверхностей твердых тел и сыграло огромную роль в открытии и понимании новых квантовых материалов, свойства которых определяются коллективными эффектами, либо их симметрией и нетривиальной топологией [1]. На данный момент ФЭСУР успешно применяется для изучения электронной структуры таких систем, как купратные и железосодержащие высокотемпературные сверхпроводники, графен и графеноподобные материалы, диалкогениды переходных металлов и топологические квантовые материалы, атомно-чистые поверхности с адсорбатами и т.д. При этом можно отметить, что исторически развитие метода ФЭСУР шло согласно решаемым с его помощью задачам. В частности, высокоразрешающие электронные спектрометры были созданы в ответ на потребность изучения субмилливольтовых энергетических псевдощелей в сверхпроводниках. С открытием топологических изоляторов и возникновением интереса к диалкогенидам переходных металлов стали активно развиваться методы детектирования спина электронов в ФЭСУР. Дальнейшее развитие метода ФЭСУР можно непосредственно связать с развитием синхротронных источников излучения для получения ранее недоступного пространственного и временного разрешения, позволяющих изучать системы, которые раньше считались неподходящими для

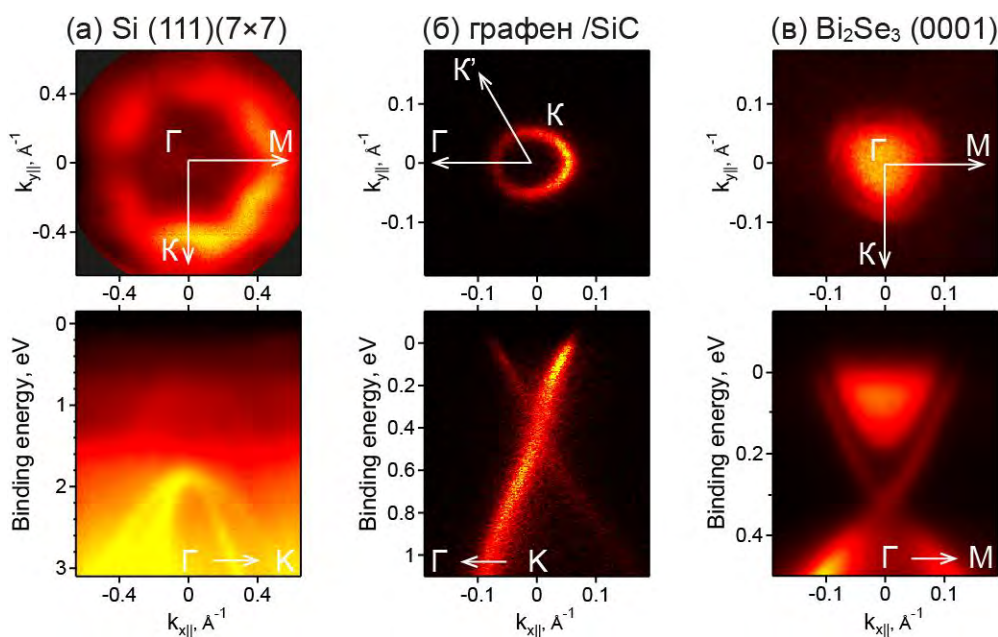
этого метода из-за неоднородностей, либо невозможности получения упорядоченной поверхности достаточной для изучения площади.

В отличие от развитых стран (и не только), в России метод ФЭСУР практически не развивался и представлен только несколькими работающими лабораторными установками в Санкт-Петербурге (СПбГУ) и Владивостоке (ИАПУ ДВО РАН).

## ARPES в ИФП СО РАН

В 2021 году новейшая установка фотоэмиссионной спектроскопии (РФЭС и ФЭСУР) была запущена в ИФП СО РАН (Новосибирск). Установка произведена компанией Specs (Германия) и оснащена полусферическим анализатором энергий электронов Astraios 190 [2] с октупольным электростатическим дефлектором электронов, позволяющим детектировать распределения фотоэлектронов по углам в конусе  $\pm 30^\circ$  и кинетическим энергиям в диапазоне от 0.5 до 200 эВ, без вращения образца, с предельными угловым и энергетическим разрешением  $0.2^\circ$  и 1.5 мэВ соответственно.

На рисунке 1 показаны примеры измеренных фотоэмиссионных спектров и карт поверхностей Ферми для поверхности различных систем: атомно-чистой поверхности Si (111) с поверхностной реконструкцией  $(7 \times 7)$ , эпитаксиального графена на поверхности SiC и поверхности скола (0001) трехмерного топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



**Рис. 1.** Карты поверхностей Ферми и дисперсии зон, измеренные методом ФЭСУР на (а) поверхности Si(111) с реконструкцией (7x7) – видны объемные состояния легких и тяжелых дырок и дисперсия поверхностные состояний в объемной запрещенной щели ( $h\nu = 21.2$  эВ, 300К), (б) эпитаксиального графена на 6H-SiC с реконструкцией ( $6\sqrt{3}\times 6\sqrt{3}$ ) в K-точке ( $h\nu = 40,81$  эВ, 300К), (в) поверхности скола (0001) трехмерного топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ( $h\nu = 21.2$  эВ, 300К)

## Станция 1-6-2 «Фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением» СКИФ

Несмотря на высокое энергетическое и угловое разрешение современных лабораторных ФЭСУР систем, все возможности данной методики полностью раскрываются только при использовании источников излучения на базе синхротронов, позволяющих варьировать энергию возбуждающего фотоэмиссионного излучения в диапазоне от мягкого УФ (10 эВ) до мягкого рентгеновского (1 кэВ) с высокой степенью монохроматичности и высокой интенсивности. При этом источники синхротронного излучения (СИ) поколений 4 и 4+ со сверхнизким эмиттансом, позволяют помимо увеличения интенсивности легко получать малый диаметр пятна излучения на образце.

Опыт использования установки ФЭСУР в ИФП СО РАН планируется перенести на станцию 1-6-2 «Фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением» ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН – первого в России и мире и источника СИ поколения 4+, запуск которого в эксплуатацию, включая экспериментальные станции первой очереди, намечен на конец 2024 года.

На данный момент идет проектирование ключевых элементов станции для обеспечения следующих параметров и возможностей:

- 1) Диапазон энергий возбуждающего фотоэмиссионного излучения – от 10 до 1500 эВ, с возможностью произвольного выбора поляризации и потоком фотонов не менее  $10^{11}$  фот./с;
- 2) Размер пятна излучения на образце менее  $10\times 10$  мкм, с потенциальной возможностью фокусировки в область  $1\times 1$  мкм;
- 3) Анализатор энергий электронов с дефлектором, обеспечивающий предельное энергетическое и угловое разрешение системы менее 1 мэВ и  $0.1^\circ$ ;
- 4) Температура образца в процессе фотоэмиссионных измерений от 4 до 400 К.
- 5) Трехмерный детектор спина фотоэлектронов на основе высокоэффективных классических детекторов Мотта.

## Литература

1. J.A. Sobota *et al.* // *Reviews of Modern Physics*, 93, 025006 (2021).
2. <https://www.specs-group.com/nc/specs/products/detail/astraios-190-2d-cmos/>



# Влияние имплантации ионов $\text{Si}^+$ на структуру и свойства бета- $\text{Ga}_2\text{O}_3$

Д.И. Тетельбаум<sup>1,\*</sup>, А.А. Никольская<sup>1</sup>, Д.С. Королев<sup>1</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1</sup>, А.И. Белов<sup>1</sup>,  
А.В. Кудрин<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, В.Н. Трушин<sup>1</sup>, Е.А. Питиримова<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>,  
Д.Е. Николичев<sup>1</sup>, Р. Н. Крюков<sup>1</sup>, М. Kumar<sup>2</sup>, R. Giulian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Indian Institute of Technology Jodhpur, NH-65 Nagaur Road Karwad, Jodhpur, 342037, India.

<sup>3</sup> Institute of Physics—Federal University of Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91501-970, Brazil.

\*tetelbaum@phys.unn.ru

Оксид галлия привлекает внимание специалистов в связи с уникальными свойствами, которые делают его «материалом номер один» для таких областей электронной техники и фотоники, как силовая электроника, детекторы газов и жесткого ультрафиолетового излучения и др. Так как одной из ключевых технологий для «традиционных» полупроводников является ионная имплантация, в работе с использованием различных методов исследованы процессы ионного разупорядочения и восстановления структурного совершенства, а также электрические свойства облученных слоев  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  при имплантации ионов  $\text{Si}^+$ . Установлена зависимость структурного совершенства от ориентации поверхности образцов. Обнаружено явление формирования слоя р-типа. Результаты демонстрируют, что электрические свойства имплантированных слоев  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  определяются конкурирующим влиянием радиационных дефектов и активацией внедренной примеси. Требуются более детальные исследования особенностей процесса ионного легирования данного полупроводника.

## Введение

В последние годы большое внимание физиков и технологов в области микроэлектроники привлечено к широкозонному оксидному полупроводнику  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Данный полупроводник перспективен для силовой электроники (полевые транзисторы, барьеры Шоттки), изготовления детекторов ультрафиолетового излучения («солнечно-слепые» фотодетекторы), высокотемпературных газовых детекторов, приборов, способных функционировать в жестких условиях (в космосе или зоне излучения ядерных реакторов) [1]. Одним из недостатков  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  является проблематичность создания материала с дырочной проводимостью.

В настоящее время, лишь единичные работы посвящены исследованию физических основ ионной имплантации  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  [2]. Между тем, широкое использование этого метода невозможно без всестороннего изучения влияния различных факторов на свойства ионно-облученных слоев.

В настоящей работе исследованы структурные, оптические и электрические свойства  $\beta$ -модификации  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , подвергнутой имплантации ионов кремния.

## Методика эксперимента

В качестве исходных образцов использовались образцы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  (Tamura corp.) с двумя ориентация-

ми поверхности – (-201) и (010) легированные Fe (полуизолирующие). Имплантация ионов  $\text{Si}^+$  проводилась с энергией 100 кэВ в интервале доз  $1 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Далее проводился последовательный постимплантационный отжиг от 600 до 950 °С (по 30 мин) в потоке  $\text{N}_2$ . Структурные особенности ионно-модифицированных слоев исследовались методами рентгеновской дифракции (РД), электронографии на отражение (ЭГО) и рентгеновской фотоэлектронной дифракции (РФД). Оптические свойства изучались методами оптического пропускания (ОП), отражения света (ОС) и рамановского рассеяния (РР). Электрические свойства были исследованы путем измерения проводимости и эффекта Холла, а также вольт-амперных характеристик (ВАХ) и их температурных зависимостей.

## Результаты и обсуждение

Испытана пригодность различных неразрушающих методов, использующих рентгеновское и оптическое излучение для анализа структурного совершенства ионно-легированных слоев  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , с учетом того, что пробег ионов существенно меньше глубины проникновения рентгеновского и оптического излучений. Метод РР не дал возможности судить о разупорядоченности структуры из изменения амплитуды или ширины пиков, но продемонстрировал рост непрерывного фона при увеличении дозы. Метод РД показал, что в отсутствие отжига

степень радиационного повреждения при облучении  $\text{Si}^+$  существенно зависит от ориентации поверхности образцов: для ориентации (-201) степень разупорядочения меньше, чем для (010). В первом случае облученный слой испытывает сжатие, а во втором – растяжение в направлении, параллельном поверхности. Методом ЭГО установлено, что приповерхностный слой (с толщиной порядка нескольких нм) менее нарушен по сравнению с более глубокими слоями (это обусловлено колоколообразным распределением дефектов при ионном облучении). После отжига при 600 °C имеет место существенное (хотя и неполное) восстановление структурного совершенства. С ростом дозы степень структурного разупорядочения закономерно возрастает, что установлено методами РД, ЭГО, РФД, а также РР, ОП и ОС.

Методом ОП (в диапазоне  $\lambda = 185\text{-}1800$  нм) установлено влияние дозы и постимплантационного отжига на эффективную ширину запрещенной зоны. Обнаружен «эффект просветления» (при  $\lambda$  больше некоторого значения), связанный, по видимому, с изменением оптических свойств границы раздела полупроводник-воздух. Метод ОС проявил чувствительность к изменению оптических свойств облученного слоя при имплантации и постимплантационном отжиге.

Исследования имплантированных образцов методом эффекта Холла и ВАХ показали, что при промежуточных температурах отжига, электрофизические свойства имплантированных слоев определяются конкуренцией между процессами отжига дефектов и активацией Si. Это приводит к немонотонной зависимости электрофизических свойств от дозы при одной и той же температуре отжига.

Примечательным результатом является обнаружение для образца (-201) ранее неизвестного факта – получения слоя р-типа при дозе ионов кремния  $4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> и температуре отжига 600 °C. Значения холловских параметров (слоевой концентрации  $p_s$  и средней подвижности носителей  $\mu$ ) были следующими:  $p_s \approx 2.5 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup>,  $\mu \approx 2$  см<sup>2</sup>/В·с. По температурной зависимости ВАХ найдены энергии активации  $E_a$  проводимости:  $E_a = 0.18$  эВ при низких ( $T \leq 200$  К) и  $E_a = 0.52$  эВ при более высоких

( $T = 200\text{-}500$  К) температурах образца. Этот результат интерпретируется, как существование прыжковой проводимости (по локализованным в «хвосте» валентной зоны состояниям) и транспорта дырок по нелокализованным состояниям при низких и высоких  $T$ , соответственно. Проводимость р-типа сохранялась на протяжении, по крайней мере, 7 суток после отжига, но перешла в n-тип при более длительной выдержке образца. Это явление, однако, нуждается в проверке и более тщательном изучении.

Итак, проведенные исследования выявили некоторые важные для технологии особенности, обусловленные как неравновесностью процессов при ионной имплантации, так и специфическими свойствами данного широкозонного и анизотропного полупроводника. В частности, продемонстрировано сильное влияние ориентации поверхности на наблюдаемой закономерности. Найден режим облучения ионами кремния и последующего отжига, приводящий к формированию слоя р-типа проводимости. Установлено, что закономерности ионного легирования данного материала существенно отличаются от закономерностей для таких «традиционных» полупроводников, как кремний или АЗВ5. Это требует проведения более детальных исследований с учетом выявленных в данной работе особенностей.

Исследование поддержано в рамках гранта БРИКС РФФИ (19-57-80011), Department of Science and Technology (DST/IMRCD/BRICS/Pilot Call 3/ Ga2O3 /2019) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Brazil). Никольская А.А. признательна за поддержку в рамках Стипендии Президента РФ (СП-1894.2021.5).

## Литература

1. S. J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary *et al.* // *Appl. Phys. Rev.*, V. 5, 011301 (2018).
2. A. Nikolskaya, E. Okulich, D. Korolev *et al.* // *Journal of Vacuum Science & Technology A*, V. 39, 030802 (2021).

# Красная граница фотопроводимости в структуре с множественными квантовыми ямами GeSiSn/Si

В.А. Тимофеев<sup>1,\*</sup>, А.А. Блошкин<sup>1</sup>, В.И. Машанов<sup>1</sup>, И.В. Скворцов<sup>1</sup>, А.И. Никифоров<sup>1</sup>, В.В. Кириенко<sup>1</sup>, И.Д. Лошкарев<sup>1</sup>, Д.Д. Фирсов<sup>2</sup>, О.С. Комков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ул. профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376.

\*Vyacheslav.t@isp.nsc.ru

На основе измерений фототока диодных структур с множественными квантовыми ямами  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y/\text{Si}$  в активной области была экспериментально определена красная граница межзонной фотопроводимости в зависимости от содержания олова в квантовых ямах. В диапазоне составов олова от 3.5 до 9% наблюдается линейная зависимость энергии красной границы фотопроводимости от состава. С увеличением содержания Sn до 15% зависимость пороговой энергии фотопроводимости от состава отклоняется от линейного закона. Обнаружено, что в структурах  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y/\text{Si}$  с псевдоморфными слоями  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y$  с содержанием Sn 15% наблюдается межзонная фотопроводимость вплоть до длины волны 2 мкм.

## Введение

Добавление Sn в матрицу Ge(Si) позволяет проводить зонный инжиниринг исходного материала. Экспериментально показано, что на основе материала GeSn перекрываются все спектральные диапазоны окон прозрачности, утвержденные Международным союзом телекоммуникаций [1]. Изменяя состав и напряженное состояние GeSn, можно регулировать рабочую длину волны в диапазоне от 1.55 мкм вплоть до 5 мкм [2]. Разработка фотонных устройств на основе материалов GeSiSn, совместимых с кремниевой технологией в инфракрасном диапазоне вблизи 2 мкм и выше, открывает возможности применений этих приборов в таких областях как сенсорика (газовые и биологические сенсоры), биомедицинская диагностика и мониторинг окружающей среды, а также астрофизика. В работе [3], исследовательской лаборатории ВВС США, материал GeSiSn рассматривается, как стратегический материал для создания экономичных, совместимых с кремниевой технологией фотоприемников среднего, а также дальнего инфракрасного диапазонов. Помимо одиночных толстых слоев GeSn, разработаны структуры, содержащие двойные гетеропереходы и множественные квантовые ямы.

В данной работе представлены исследования фотопроводимости диодов с p-i-n структурой, включающей множественные квантовые ямы  $\text{SiGeSn}/\text{Si}$  с различным содержанием олова от 0 до 15%.

## Эксперимент

Все образцы выращивались на подложках p<sup>+</sup>-Si. На поверхности Si выращивался буферный слой толщиной 200 нм. После роста буферного слоя на поверхности формировалась активная область, состоящая из 10 квантовых ям  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y$  толщиной 2 нм, разделенных слоями кремния толщиной 7 нм. Содержание олова y в образцах менялось от 0 до 15%. После роста активной области выращивался верхний слой нелегированного кремния и завершающий слой p<sup>+</sup>-Si, необходимый для формирования диода. Контроль изменения морфологии и поверхностной структуры проводился в процессе роста с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Методом рентгеновской дифрактометрии были исследованы состав и качество эпитаксиальных структур. Детекторы были изготовлены с помощью оптической литографии, плазменного травления и осаждения металлов в вакууме. Измерение спектров фотопроводимости выполнялось с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Vertex-70 компании Bruker. Для регистрации фототока использовался низкошумящий предусилитель SR570 от компании Stanford Research system. В качестве источника освещения использовалась галогеновая лампа.

## Результаты и обсуждение

Была получена серия образцов, включающих множественные квантовые ямы  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y/\text{Si}$ , а также сильнолегированные области p- и n-типа про-

димости. Одной из проблем получения атомарно-гладкой поверхности  $n^+$ -Si с использованием сурьмы в качестве легирующей примеси является низкая температура роста 375-400 °С. Повысить качество поверхности удалось в структурах с содержанием олова больше 13% вследствие сегрегации Sn, которое действует в качестве сурфактанта, ускоряющего поверхностную диффузию кремния. Перед тем как монтировать изготовленные детекторы в криостат для проведения фотоэлектрических измерений проводился контроль ВАХ приборов при комнатной температуре. Результаты измерений приведены на рисунке 1. Все приборы имели диодные ВАХ.

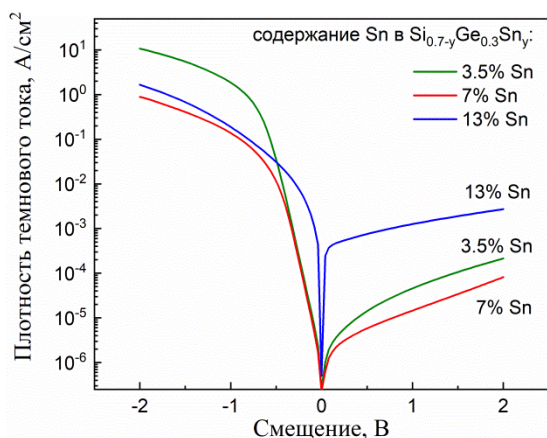


Рис. 1. Темновые вольт-амперные характеристики фотодиодов, измеренные при  $T=300$  К

На рисунке 2 представлены нормализованные зависимости фототока для образцов. Для всех образцов наблюдается большой пик фотопроводимости с энергией 1.4-1.5 эВ, связанный с межзонными переходами в кремнии. При уменьшении энергии фотона ниже 1.17 эВ (ширина запрещенной зоны в кремнии) наблюдается постепенно уменьшающийся хвост фототока. Энергия оптического перехода изменяется практически линейно при увеличении содержания олова от 3.5 до 9%, а вот для образца, содержащего 12.5% энергия перехода отклоняется от линейного закона. Из красной границы фотоэффекта можно определить величину разрыва зон на гетерогранице Si/SiGeSn. Для этих целей было проведено математическое моделирование энергии локализации дырки в квантовой яме SiGeSn/Si с учетом деформаций в слое SiGeSn, возникающих из-за рассогласования параметров решетки слоя твердого раствора и кремния. Моделирование положения зон и спектра дырок в гетероструктурах SiGeSn выполнялось в рамках 6-ти зонной кр-

модели. Была рассчитана зонная диаграмма структуры с множественными квантовыми ямами и определены возможные оптические переходы. Наиболее вероятные оптические переходы идут между подзоной тяжелых дырок в слое  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y$  и X-долиной в кремнии. Кроме того, были построены зависимости энергии оптического перехода между основным состоянием дырки в квантовых ямах и зоной проводимости кремния от величины разрыва валентных зон в гетероструктуре  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y/\text{Si}$  и от величины деформационного потенциала валентной зоны олова для различных составов твердого раствора.

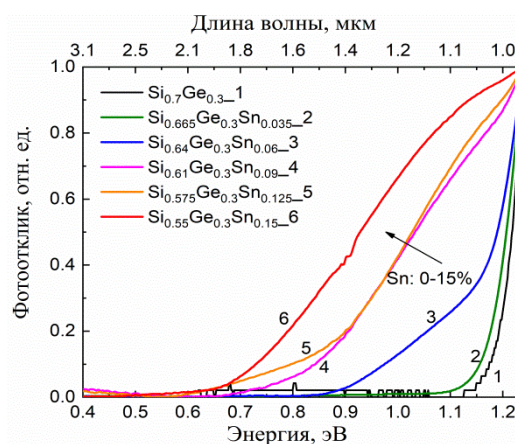


Рис. 2. Зависимость фотоотклика от длины волны при различном содержании олова в фотовольтаическом режиме

## Заключение

Впервые исследована фотопроводимость структур с множественными квантовыми ямами  $\text{Si}_{0.7-y}\text{Ge}_{0.3}\text{Sn}_y/\text{Si}$  в широком диапазоне содержания олова. Показано, что красная граница фотопроводимости для структур с содержанием олова 15% около 2 мкм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-79-10092).

## Литература

1. S. Su, B. Cheng, C. Xue *et al.* // Optics Express, V. 19, 6400 (2011).
2. H. Tran, T. Pham, J. Margetis *et al.* // ACS Photonics, V. 6, 2807 (2019).
3. C.J. Reyner, G. Ariyawansa, B. Clafin *et al.* // Applied Optics, V. 60, G162 (2021).

# Распределение концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях Ge и GeSn, выращенных на $n^+$ -Si(001) подложках

А.М. Титова\*, С.А. Денисов, В.Ю. Чалков, Н.А. Алябина, В.Г. Шенгуров

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр-т Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*asya\_titova95@mail.ru

Установлено, что при осаждении слоев Ge или GeSn путём разложения  $GeH_4$  на горячей проволоке (англ. Hot Wire Chemical Vapor Deposition, HW CVD) на сильнолегированной донорной примесью подложки происходит их *in situ* легирование и слои становятся *n*-типа проводимости.

## Введение

Эпитаксиальные слои (ЭС) Ge и  $Ge_{1-x}Sn_x$ , выращенные на кремниевой подложке, широко исследуются для использования в приборах и устройствах микро- и оптоэлектронике. Для этого необходимо выращивать их с высоким структурным совершенством и легированными до разной степени ( $10^{16}$ - $10^{20}$   $см^{-3}$ ). Необходимо также проводить оценки слоев по концентрации носителей заряда, поскольку они как раз и наиболее важны для использования гетероструктур (ГС) в приборах, характеризуют положение и "резкость" переходов.

В фотодетекторах ИК-диапазона и солнечных элементах используются *p-i-n*-структуры со слоями Ge или GeSn, выращенных на сильнолегированной кремниевой подложке, в частности,  $n^+$ -типа. При этом важно управлять концентрацией носителей и типом проводимости в прилегающем к подложке эпитаксиальном слое.

В данной работе исследуется распределение концентрацией носителей заряда в таких гетероэпитаксиальных структурах, выращенных одним из перспективных низкотемпературным методом газофазного осаждения с разложением моногермана на «горячей проволоке» (HW CVD).

## Методика эксперимента

Рост ГС со слоями Ge или GeSn проводился на подложках Si(001), вырезанных из монокристаллов марки КЭС-0,01 или КЭМ-0,003, на установке, описанной в [1]. После предэпитаксиального термического отжига их в установке при температуре  $T_s = 1000 \div 1200$  °C в течение 10 минут их температуру снижали до  $450 \div 600$  °C и растили буферный слой сублимацией кремниевых источников, выре-

занных из Si такой же марки, как подложки. Затем температуру подложки снижали до 300 °C при росте слоев Ge или до 200 °C при росте слоев GeSn, напускали моногерман ( $GeH_4$ ) до давления  $(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$  Торр, нагревали Ta-полоску до 1400 °C и растили слои.

В некоторых случаях слои Ge или GeSn легировали атомами Ga [2] путем испарения их из сублимирующего при  $\sim 920$  °C источника, вырезанного из слитка монокристаллического Ge марки ГДГ-0,001.

Путем металлизации и фотолитографии формировали барьер Шоттки типа Ta-Pd-Au на поверхности слоев. Измерение профиля концентрации носителей заряда проводили вольт-емкостным методом.

## Результаты и обсуждение

Измеренные значения концентрации носителей заряда приведены в таблице 1. В первой серии опытов при росте чистых (нелегированных) слоев Ge на  $n^+$ -Si(001) видно, что как в случае использования подложки и роста буферного слоя одинаковой марки кремния (КЭМ-0,003 и КЭС-0,01), так и при разных марках (опыт 11-933) выращенные слои были *n*-типа и имели близкую концентрацию носителей (в среднем  $(4 \div 5) \cdot 10^{16}$   $см^{-3}$ ).

Во второй серии опытов при росте легированных слоев Ge:Ga на  $n^+$ -Si(001) слои были также *n*-типа проводимости, но концентрация носителей заряда была выше (в среднем  $(3 \div 4) \cdot 10^{17}$   $см^{-3}$ ).

В третьей серии опытов при росте слоев GeSn на  $n^+$ -Si(001) подложках слои были также *n*-типа проводимости с концентрацией носителей заряда  $\sim 2 \cdot 10^{17} \div 1 \cdot 10^{18}$   $см^{-3}$ .



**Таблица 1.** Концентрации носителей заряда (N)1-я серия опытов: слои Ge на n<sup>+</sup>-Si(001)

№	10-951	11-637	10-996	11-933
Подложка	КЭМ-0,003	КЭМ-0,003	КЭС-0,01	КЭМ-0,003
Буф. слой	- // -	- // -	- // -	КЭС-0,01
N, 10 <sup>16</sup> см <sup>-3</sup>	4	6	5 ÷ 9	3
d, мкм			0,5	0,5

2-я серия опытов: слои Ge:Ga на n<sup>+</sup>-Si(001)

№	10-846	10-849	11-932
Подложка	КЭС-0,01	КЭМ-0,003	КЭМ-0,003
Буф. слой	КЭМ-0,002	КЭМ-0,002	КЭС-0,01
N, 10 <sup>17</sup> см <sup>-3</sup>	3	3	8
d, мкм	0,6	0,8	0,55

3-я серия опытов: слои Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> с на n<sup>+</sup>-Si(001)

№	11-932	11-897	11-840	11-888
Подложка	КЭМ-0,003	КЭМ-0,003	КЭС-0,01	КЭМ-0,003
Буф. слой	КЭС-0,01	КЭМ-0,005	КЭМ-0,005	отжиг
N, 10 <sup>17</sup> см <sup>-3</sup>	8	2	10	60
d, мкм	0,5	0,5	0,7	0,65

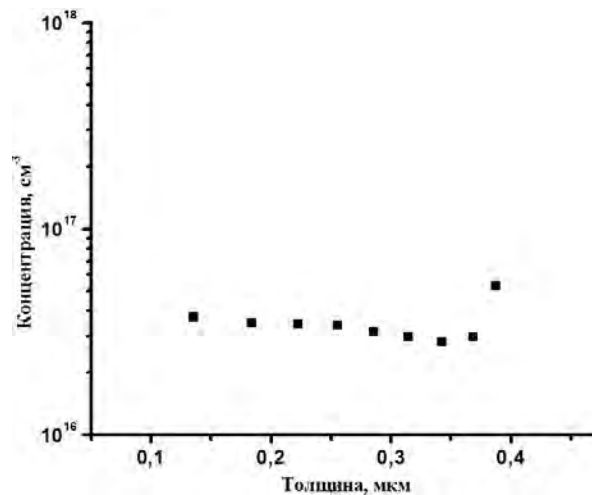
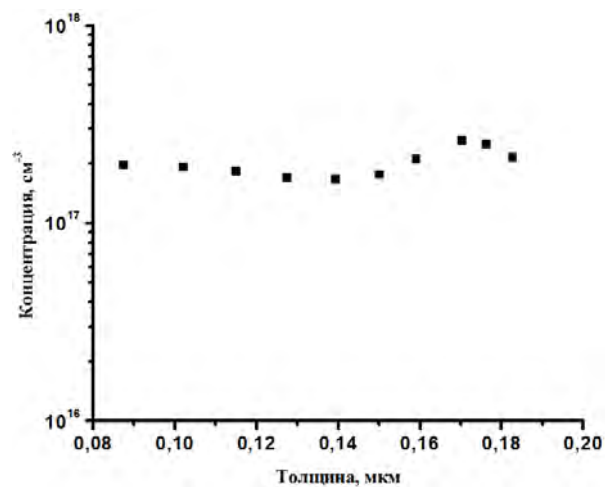
Отметим также, что слои Ge или GeSn, выращенные на высокоомных подложках p-типа проводимости были p-типа. Как те, так и другие имели концентрацию дырок  $(5 \div 10) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в слоях Ge и  $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в слоях Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> с  $x = (2 \div 4)\%$ . Акцепторные уровни дают вакансии, которые образуются в слое Ge или GeSn за счет несоответствия параметров решеток этих слоев с Si-подложкой.

На рис.1 и 2 приведены профили распределения концентрации носителей заряда (электронов) в гетерослоях Ge и GeSn, выращенных на подложках из Si(001) марки КЭМ-0,003. Видно, что концентрация электронов достаточно однородно распределена по глубине слоев и возрастает вблизи границы с буферными слоями.

Отметим, также, что проведение отжига выращенных слоев позволяет увеличить концентрацию электронов в них. Так в опыте 11-888 отжиг слоя GeSn при 750 °С в течение 10 минут увеличил концентрацию до  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Для объяснения получения слоев Ge или GeSn p-типа проводимости при росте их на сильнолегированной донорной примесью Si подложке можно рассмотреть следующее. При низкотемпературном

осаждении буферного слоя Si n<sup>+</sup>-типа на поверхности роста его сегрегируют As или Sb. Этот сегрегационный слой может служить резервуаром примеси, из которого легируются слои Ge или GeSn при низкотемпературном росте.

**Рис. 1.** Распределение концентрации электронов в гетероэпитаксиальном слое Ge (образец 11-933)**Рис. 2.** Распределение концентрации электронов в гетероэпитаксиальном слое Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> (образец 11-897)

Работа поддержана РФФ (22-22-00866).

## Литература

1. В.Г. Шенгуров, Денисов С.А., Чалков В.Ю. и др. // Письма в ЖТФ, Т.41, 71 (2015).
2. V.G. Shengurov, S.A. Denisov, V. Yu. Chalkov *et al.* // Materials Science and Engineering B, V. 259, 114579 (2020).



# Генерация стимулированного излучения в районе 4 мкм в HgCdTe структуре с микродисковыми резонаторами при температурах, достижимых при термоэлектрическом охлаждении

В.В. Уточкин<sup>1,\*</sup>, М.А. Фадеев<sup>1</sup>, В.В. Румянцев<sup>1,2</sup>, К.Е. Кудрявцев<sup>1</sup>, А.О. Трошкин<sup>1,2</sup>, В.И. Гавриленко<sup>1,2</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>3</sup>, Е.Е. Морозова<sup>1</sup>, Д.В. Шенгуров<sup>1</sup>, С.В. Морозов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>3</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*xenonum@bk.ru

В работе получено стимулированное излучение от 4.1 до 5.1 мкм в двумерном массиве микродисковых резонаторов различного диаметра (5 – 40 мкм), изготовленном из волноводной гетероструктуры с множественными КЯ HgCdTe/CdHgTe. Генерация наблюдалась при температурах вплоть до 260 К, достижимых при использовании термоэлектрического охлаждения. Наблюдаемая полуширина линии стимулированного излучения указывают на возможность проявления резонаторных свойств мод шепчущей галереи в данной структуре.

## Введение

Компактные полупроводниковые источники в окне прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм представляют большой интерес для ряда применений, связанных с химическим анализом, медициной и мониторингом окружающей среды за счёт наличия в этом диапазоне фундаментальных линий поглощения CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, а также других ключевых технологических газов и поллютантов. Для квантово-каскадных лазеров уже продемонстрирована возможность мощной непрерывной генерации при комнатной температуре. Однако, высокие требования к ростовой технологии и высокая стоимость изготовления препятствуют широкому распространению каскадных лазеров, и разработка межзонных лазеров среднего ИК диапазона остаётся актуальной задачей. Гетероструктуры с узкими квантовыми ямами (КЯ) Hg(Cd)Te/CdHgTe являются одной из перспективных полупроводниковых систем для излучателей среднего ИК диапазона.

## Методика эксперимента

Исследованная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей GaAs (013) подложке с буферами из ZnTe (50 нм) и CdTe (10 мкм) с *in situ* эллипсометриче-

ским контролем состава и толщины слоев. *Ex situ* характеристика структур проводилась при помощи экспресс-методики, описанной в работе [1].

Структура содержала в активной области массив из 13 КЯ Hg<sub>0.92</sub>Cd<sub>0.08</sub>Te/Cd<sub>0.75</sub>Hg<sub>0.25</sub>Te, каждая толщиной 2.7 нм. Двумерный массив микродисковых резонаторов (см. рис. 1) был сформирован при помощи масочной фотолитографии, диаметры дисков варьировались в диапазоне 5 – 40 мкм с шагом в 5 мкм, высота дисков составляла ~4 мкм.

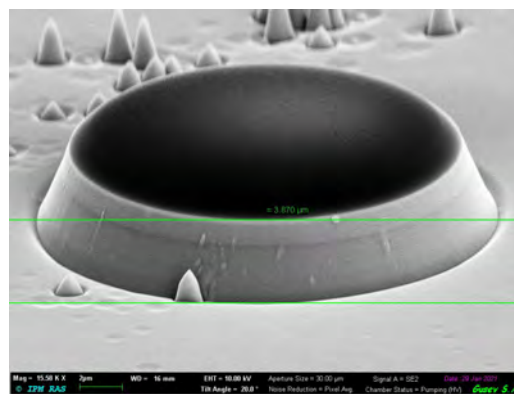


Рис. 1. СЭМ изображение одиночного 10 мкм микродиска

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки. Образец устанавливался на холодный палец оптического гелиевого криостата замкнутого цикла (Advanced Research Systems DE-202, T = 8 – 300 К).

Оптическое возбуждение структуры обеспечивалось ПГС ближнего ИК диапазона (частота повторения импульсов - 10 Гц, длительность импульса - 10 нс, диапазон длин волн генерации: 1.94 – 2.36 мкм, энергия в импульсе 20 – 30 мДж). Интенсивность оптического возбуждения варьировалась при помощи набора стеклянных оптических аттенуаторов. В эксперименте луч лазера накачки был направлен под 45 градусов к поверхности образца. Излучение от образца заводилось при помощи эллиптического зеркала в ИК фурье-спектрометр Bruker Vertex 80v, работавший в режиме пошагового сканирования.

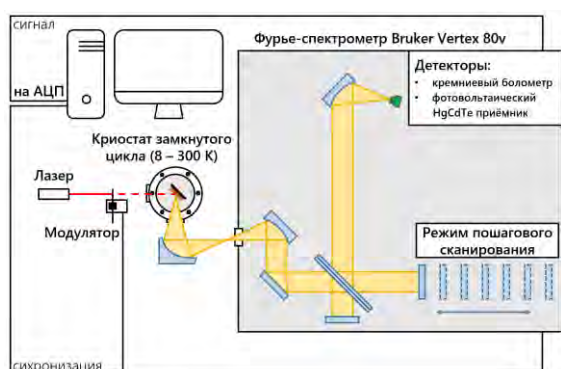


Рис. 2. Схема эксперимента для измерений спонтанного и стимулированного излучения

## Результаты и обсуждение

Спектры стимулированного излучения (СИ) массива микродисковых резонаторов были измерены в широком температурном диапазоне и приведены на рис. 3. Переход от спонтанного излучения к стимулированному процессу контролировался по обужению спектра, а также сверхлинейному росту сигнала с увеличением мощности накачки. Выше температуры в 260 К наблюдался лишь слабый широкий спектр спонтанного излучения при любой интенсивности оптического возбуждения.

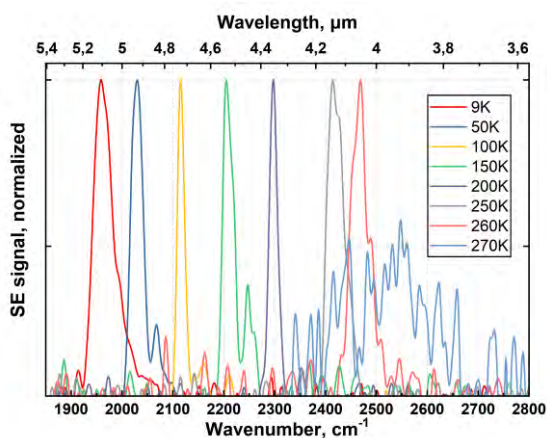


Рис. 3. Температурная эволюция спектров излучения массива микродисковых резонаторов

На рисунке отчётливо прослеживается сложная структура спектров излучения при определённых температурах. Подобное поведение спектров может быть объяснено наличием в массиве микродисковых резонаторов различного диаметра. В области низких температур все микродисковые резонаторы имеют низкие пороги генерации СИ и не могут быть чётко разделены варьированием мощности возбуждения, которая ограничена несколькими дискретными значениями, определяющимися использованным набором оптических аттенуаторов. По мере роста температуры, пороги генерации для микродисков малого диаметра растут быстрее, чем для дисков большего диаметра, и становится возможным получить узкие линии генерации от массива резонаторов. Так, в диапазоне температур 100 – 200 К было получено СИ с наименьшей полушириной (меньше 1 мэВа для температуры 100 К, см. рис. 4).

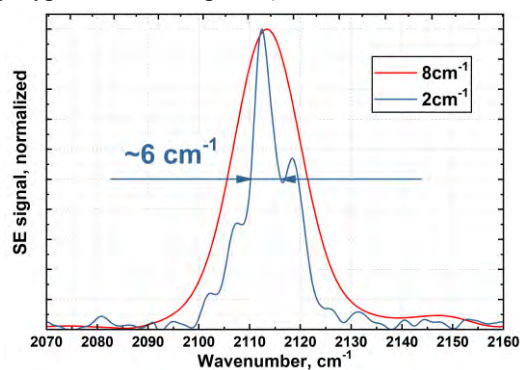


Рис. 4. Полуширина спектра излучения исследованной структуры при температуре 100 К

Для сравнения, измеренная полуширина однопроходowego СИ для такой же непроцессированной структуры была в несколько раз выше при той же температуре [2], что свидетельствует в пользу относительно высокой добротности спрoцессированных микродисковых резонаторов. При высоких температурах наблюдается уширение спектров СИ массива микродисковых резонаторов, что объясняется уширением спектра усиления в микродисковых резонаторах за счёт разогрева носителей заряда.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования (грант № 075-15-2020-906, ИЦМУ "Фотоника").

## Литература

1. С. В. Морозов, В. В. Уточкин, В. В. Румянцев *et al.* // Письма в ЖТФ, 47(3), стр. 51-54 (2021).
2. К. Е. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev *et al.* // Applied Physics Letters, 117, 083103 (2020).

# Новые дизайны лазерных переходов квантово-каскадных структур ТГц диапазона для получения высокой мощности и для работы при повышенных температурах

Д.В. Ушаков<sup>1\*</sup>, А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2</sup>, А.А. Васильевский<sup>3</sup>, В.И. Гавриленко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

<sup>2</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 1115409, Москва, Россия.

<sup>4</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*ushakovdv@bsu.by

Предложены два новых дизайна лазерных переходов квантово-каскадных структур на основе GaAs/AlGaAs для получения высокой мощности излучения и увеличения рабочих температур. Первый дизайн основан на использовании двух фотонной схемы лазерных переходов, что обуславливает приблизительно в 2 раза более медленное насыщение коэффициента усиления с ростом плотности фотонов и высокую расчетную мощность (~600 мВт) при азотных температурах. Второй дизайн основан на концепции использования рабочих уровней с волновыми функциями, простирающимися на два и более периода структуры, что позволяет увеличить матричный элемент дипольных переходов. При этом, нижний лазерный уровень имеет больший энергетический зазор с инжектором, менее заселен и температурно стабилен по сравнению с традиционными дизайнами, что позволяет ожидать максимальную рабочую температуру ~250 К.

## Введение

Реализованные в настоящее время квантово-каскадные лазеры (ККЛ) преимущественно созданы на основе структур GaAs/AlGaAs с дизайном «резонансное испускание оптического фонона» [1–5]. В терагерцовой области частот рабочие температуры постоянно повышались как за счет минимизации потерь [2, 6], так и оптимизации матричных элементов дипольных переходов  $Z_{nm}$  между рабочими уровнями и числа квантовых ям (КЯ) [1–6]. Для уменьшения утечек в континуум предлагались схемы с увеличенной высотой барьерных слоев [7–8].

В настоящей работе предложены новые конструкции ТГц ККЛ на основе GaAs/AlGaAs и обсуждаются особенности двух разработанных дизайнов лазерных переходов для получения высокой мощности излучения и увеличения рабочих температур.

## Теоретическая модель и новые дизайны лазерных переходов

Вольт-амперная характеристика каскада находилась методом балансных уравнений с периодическими граничными условиями [9–10]. Базисные волновые функции находились **к р**-методом [10] с последующим преобразованием специального вида для учета дефазировки [9,10]. Вероятности переходов

учитывали процессы туннелирования, электрон-электронного рассеяния, рассеяния на оптических фононах, заряженных примесях, шероховатостях гетерограниц.

Основной задачей проектирования ККЛ является получение усиления структуры на возрастающем участке вольт-амперной характеристики. Первый дизайн – для получения высокой мощности излучения получен путем сканирования толщин барьерных слоев и КЯ для активной области из 4-х КЯ. На рисунке 1 а–в приведены расчеты уровней энергии и волновых функций, а также температурные зависимости населенностей уровней, спектры усиления и мощности излучения для одной из оптимальных структур  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ , слои которой составляют 3.39/16.37/5.08/8.47/2.26/9.03/2.26/7.9 нм. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией  $4.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Схема лазерных переходов основана на использовании туннелирования с уровня инжектора 1' на верхний рабочий уровень 5, двух последовательных лазерных переходов (5-4 и 4-3) и опустошения нижнего рабочего уровня 3 за счет туннелирования на уровень 2 и резонансного испускания оптического фонона. При этом, рабочее напряжение на одном каскаде близко к сумме двух энергий излучения и энергии продольного оптического фонона  $2 \hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$ . Эффективность схемы  $2 \hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$

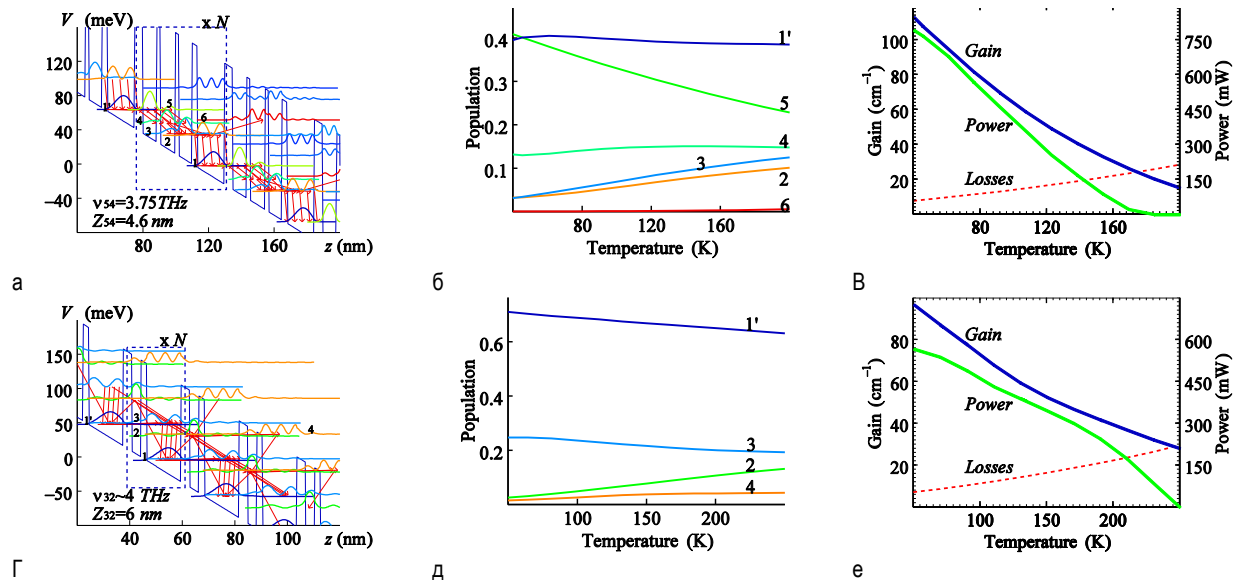


Рис. 1. (а, г) Диаграммы зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов, рассчитанные  $k p$ -методом, для оптимизированных ТГц ККЛ на основе GaAs/AlGaAs при напряжении на каскаде  $V_1=65.5$  (а) и  $52.5$  мВ (г) и температуре  $T=77$  (а) и  $200$  К (г), температурные зависимости населенностей энергетических уровней (б, д), а также (в, е) коэффициентов усиления и потерь на частоте генерации и мощности излучения

подтверждается приближенно в 2 раза более медленным насыщением коэффициента усиления с ростом плотности фотонов по сравнению с традиционной схемой  $\hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$ . Расчеты на рисунке 1 в показывают, что при азотных температурах достигается высокое значение мощности  $\sim 600$  мВт, а максимальная рабочая температура составляет  $180$  К.

Второй дизайн для повышения рабочих температур ККЛ основан на концепции использования слабо локализованных состояний с волновыми функциями, простирающимися на два и более периодов структуры [10]. На рисунке 1 г–е приведены расчеты уровней энергии и волновых функций, а также температурных характеристик для одной из оптимальных структур, толщины слоев которой барьер/КЯ слева направо имеют следующие значения:  $2.26/12.99/3.39/3.39$  нм. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . В предложенном дизайне волновые функции, соответствующие рабочим уровням 3 и 2, оказываются протяженными и слабо локализованными. При этом достигается большой матричный элемент дипольных переходов  $Z_{32} = 6$  нм. Предложенный дизайн с 2 КЯ характеризуется гибридной схемой накачки, основанной на резонансных туннельных переходах с уровня инжектора  $1'$  на верхний лазерный уровень 3 следующего периода. Однако, населенность верхнего лазерного уровня 3 слабо связана с населенностью инжекторного уровня  $1'$  и синхронизирована через

электрон-фононное взаимодействие с населенностью нижнего лазерного уровня 2 следующего (предыдущего) периода. При этом, расчетное значение максимальной рабочей температуры составляет  $\sim 250$  К.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-72-30020.

## Литература

1. B.S. Williams// Nature Photonics, V. 1, 517 (2007).
2. H. Luo, S.R. Laframboise, Z.R. Wasilewski et al. // Appl. Phys. Lett., V. 90, 041112 (2007).
3. M.A. Belkin, J.A. Fan, S. Hormoz et al. // Opt. Exp., V. 16, 3242 (2008).
4. S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno // Appl. Phys. Lett., V. 94, 131105 (2009).
5. S. Fathololoumi, E. Dupont, C.W.I. Chan et al. // Optics Express, V. 20, 3866 (2012).
6. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника, Т. 48, 1005 (2018).
7. L. Bosco, M. Franckie, G. Scalari et al.// Appl. Phys. Lett., V. 115, 010601(2019).
8. A. Khalatpour, A.K. Paulsen, C. Deimert et al. // Nature Photonics, V. 15, 16 (2021).
9. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника, Т. 49, 913 (2019).
10. D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, et al. // Opt. Express, 28 (17), 25371 (2020).

# Усиление терагерцового излучения в графене с постоянным дрейфом за счет колебаний динамической массы электронов

Д.В. Фатеев<sup>1, 2, \*</sup>, И.М. Моисеенко<sup>1</sup>, В.В. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019.

<sup>2</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012.

\*fateevdv@yandex.ru

Теоретически исследованы причины усиления терагерцового излучения в графене с постоянным дрейфом носителей заряда в гидродинамическом приближении. Рассмотрен случай малых волновых векторов электромагнитного поля. Показано, что в графене с постоянным электрическим током возможно усиление нормально падающего ТГц излучения за счет колебаний плотности динамической массы электронов.

## Введение

Двумерный материал графен привлекает к себе внимание благодаря уникальным свойствам, возникающим благодаря линейному спектру Дираковских электронов. Одним из перспективных направлений применения графена является терагерцовая оптоэлектроника. В частности, графен предлагается использовать в (терагерцовой) ТГц плазмонике, поскольку величины времени релаксации импульса электронов позволяют эффективно возбуждать ТГц плазменные резонансы. Транспорт электронов в графене в нижней части ТГц диапазона проявляет яркие гидродинамические свойства, такие как вязкость двумерной электронный жидкости [1], замедление плазменных волн медленнее скорости Ферми в графене [2] и усиление плазмонов в графене за счет эффекта Вавилова-Черенкова [3].

Опираясь на работы Дьяконова и Шура [4], гидродинамическое описание графена использовалось во множестве работ (например, [5,6]) и позволяет описать такие эффекты как электрон-дырочное трение и звук, плазмоны, нелинейные эффекты выпрямления ТГц излучения в графене и др. В работе [7] предсказана возможность нечеренковского усиления ТГц плазмонов в графене с постоянным дрейфом при малых волновых числах.

## Результаты и обсуждение

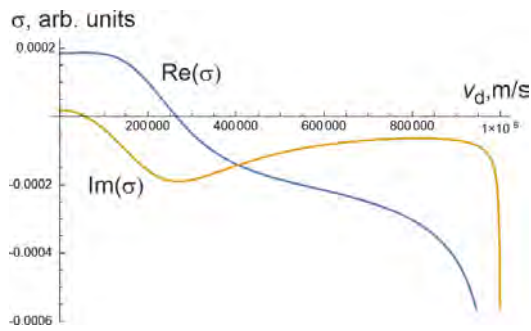
В данной работе исследован физический механизм усиления ТГц излучения в графене с постоянным дрейфом электронов при малых волновых числах. Взаимодействие полей электромагнитной волны с

графеном рассмотрено в гидродинамическом пределе с учетом пространственной дисперсии в графене, возникающей при диффузионном транспорте в графене в дополнение к Кулоновскому взаимодействию электронов. Решены линеаризованные гидродинамические уравнения динамики электронов в графене в присутствии постоянного электрического тока. Вычислены линейные по действующему осциллирующему электрическому полю  $E_x(t)$  величины гидродинамической скорости электронов  $v(t)$ , плотности электрического тока  $j(t)$ , концентрации  $n(t)$  и массовой плотности электронов  $\rho(t)$  в графене. Получено выражение для проводимости графена  $\sigma$  в гидродинамическом приближении в присутствии постоянного электрического тока при условии малых волновых чисел [7]. Такое условие, в частности, может быть выполнено при нормальном падении электромагнитной волны на графен.

Исследовано преобразование электромагнитной энергии при взаимодействии ТГц полей с графеном. Преобразование энергии постоянного тока в энергию электромагнитного поля описывается выражением средней поглощаемой мощности за период колебания  $\langle Q \rangle = 0.5 j^* E_x = 0.5 \text{Re}(\sigma) |E|^2$ , причем отрицательные значения  $\langle Q \rangle < 0$ , соответствуют режиму усиления электромагнитной волны за счет энергии электрического тока. Режим усиления описывается отрицательной действительной частью проводимости (рис. 1).

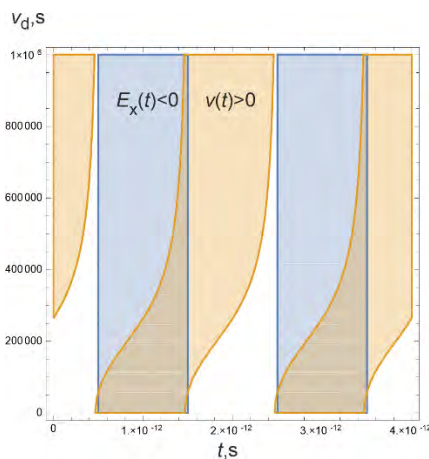
Выяснено, что возникающее усиление ТГц излучения в графене с постоянным дрейфом электронов при нулевых волновых числах возникает на частотах 100 ГГц – 1 ТГц. Постоянный электрический ток





**Рис. 1.** Зависимость действительной и мнимой частей проводимости графена от скорости дрейфа носителей заряда.

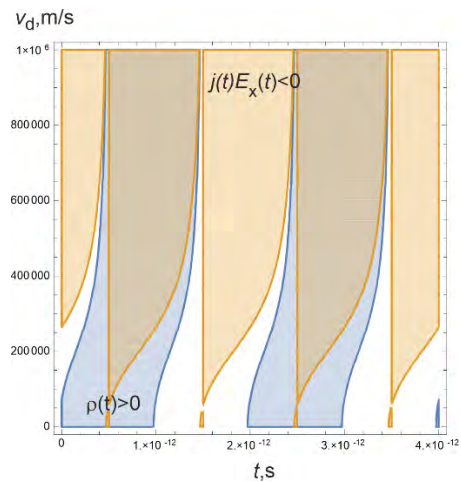
Параметры:  $\omega = 2\pi \times 0.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma = 2\pi \times 5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$



**Рис. 2.** Зависимость осциллирующих во времени электрического поля и линейной скорости носителей заряда от скорости дрейфа носителей заряда. Синим цветом показаны области отрицательных значений электрического поля. Желтым цветом показаны области положительных значений линейной скорости

в графене изменяет фазу отклика (скорости и плотности массы электронов) графене на колеблющееся электрическое поле таким образом, что осциллирующие электроны движутся против электрического поля, что и приводит к преобразованию энергии постоянного тока в энергию ТГц поля (рис. 2 при скорости постоянного дрейфа  $v_d > 225000 \text{ m/s}$ ). При

этом движения носителей заряда в графене сопровождаются колебаниями электромагнитной мощности  $Q(t) = jE_x$ , которая в части периода колебаний является отрицательной в усилительном режиме (рис. 3 при скорости постоянного дрейфа  $v_d > 225000 \text{ m/s}$ ). Выяснено, что выделение электромагнитной энергии происходит синхронно с колебаниями массовой плотности заряда  $\rho(t)$  в графене в случае, когда в процессе ТГц колебаний рост плотности массы совпадает с ростом ускоряющего электрического поля (рис. 2 и 3). В двумерном электронном газе с постоянной эффективной массой электронов такой эффект усиления не наблюдается.



**Рис. 3.** Зависимость осциллирующих во времени линейной плотности массы электронов и осциллирующей плотности электромагнитной мощности  $j(t)E_x(t)$  от скорости дрейфа носителей заряда. Синим цветом показаны области положительных значений линейной плотности массы электронов. Желтым цветом показаны области отрицательных значений плотности электромагнитной мощности

Таким образом показано, что в графене с постоянным электрическим током возможно усиление нормально падающего ТГц излучения за счет колебаний плотности динамической массы электронов.

## Литература

1. D.A. Bandurin *et al.* // Nature Communications, V. 9, 4533 (2018).
2. D. Svintsov // Physical Review B, V. 97, 121405(R) (2018).
3. D. Svintsov // Physical Review B, V. 100, 195428 (2019).
4. M. Dyakonov, M. Shur // Phys. Rev. Lett., V. 71(15), 2465 (1993).
5. R. Roldán *et al.* // Solid State Communications, V. 114, 175-176 (2013).
6. A. Tomadin, M. Polini // Phys. Rev. B, V. 88, 205426 (2013).
7. I. M. Moiseenko, V. V. Popov, D. V. Fateev // Physical Review B, V. 103, 195430 (2021).



# ТГц квантово-каскадные лазеры с испусканием двух фотонов в одном усиливающем модуле, выращенные методами МЛЭ и МОС-гидридной эпитаксии

Р.А. Хабибуллин<sup>1, 2, \*</sup>, А.А. Афоненко<sup>3</sup>, Д.В. Ушаков<sup>3</sup>, С.С. Пушкарев<sup>1, 2</sup>, Р.Р. Галиев<sup>1, 2</sup>, Д.С. Пономарев<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>4</sup>, А.Н. Клочков<sup>4</sup>, А.Н. Виниченко<sup>4</sup>, М.А. Ладугин<sup>5</sup>, Т.А. Багаев<sup>5</sup>, А.А. Мармалюк<sup>5</sup>, К.В. Маремьянин<sup>6</sup>, В.И. Гавриленко<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105.

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, Беларусь, 220030.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, 1115409.

<sup>5</sup> АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», ул. Введенского, 3, Москва, 117342.

<sup>6</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, 607680.

\*khabibullin@isvch.ru

В работе предложена и экспериментально реализована новая схема работы ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) с последовательным испусканием двух фотонов в одном усиливающем модуле. В отличие от традиционной схемы с одной парой лазерных уровней, в предложенной схеме электроны совершают переход через дополнительный энергетический уровень, который является нижним лазерным уровнем для первого излучательного перехода и верхним лазерным уровнем для второго излучательного перехода. Это приводит к прохождению электронов в усиливающем модуле по схеме «резонансное туннелирование – фотон – фотон – фон». На основе предложенной схемы был оптимизирован двух-фотонный дизайн ТГц ККЛ с активным модулем (инжектор и усиливающий модуль) из четырех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As с максимумом усиления вблизи 3.8 ТГц. Лазерные структуры с активной областью на основе двухфотонного дизайна были выращены с помощью двух эпитаксиальных методик – молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ). Изготовленные ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом на основе золота продемонстрировали хорошую толерантность к ростовым методам, поскольку спектры излучения лазеров на МЛЭ- и МОСГЭ-структурах очень близки.

## Введение

Квантово-каскадные лазеры терагерцевого диапазона (ТГц ККЛ) непрерывно улучшают излучательные (выходная мощность, режимы генерации и др.) и эксплуатационные (рабочая температура, потребляемая электрическая мощность и др.) характеристики, что является большим преимуществом по сравнению с конкурирующими источниками ТГц волн. Данный прогресс ТГц ККЛ в первую очередь связан с развитием зонных дизайнов полупроводниковых лазерных структур, состоящих из набора туннельно-связанных квантовых ям (КЯ), что обеспечивает большое число степеней свободы для оптимизации (толщины и количество КЯ, высота потенциальных барьеров, механизмы инжекции/экстракции электронов и др.).

В данной работе предложена новая «двухфотонная» схема работы ТГц ККЛ и продемонстрированы спектральные характеристики лазеров, изготовленных на основе двухфотонной схемы.

## Двухфотонная схема

Чрезвычайно малая энергия ТГц фотона (4–20 мэВ) позволяет включить дополнительную «ступень» в энергетическую лестницу электронных уровней усиливающего модуля при использовании традиционной гетеропары GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As. При этом «паразитная» инжекция с уровня  $i'$  на уровень  $l$  для однофотонного дизайна начинает играть положительную роль для накачки второго излучательного перехода  $i' \rightarrow l(u)$  в двухфотонном дизайне (см. рис. 1).

## Результаты

На основе предложенной двухфотонной схемы был оптимизирован дизайн ТГц ККЛ с активным модулем из четырех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As с максимумом усиления вблизи 3.8 ТГц. ТГц ККЛ с Au-Au волноводом были изготовлены на основе лазерных структур, выращенных с помощью МЛЭ и МОСГЭ. Толщина активной области выращенных структур составляла около 10

мкм, что включает 185 повторений активного модуля. Описание роста методом МЛЭ представлено в работе [1]. В МОСГЭ в качестве исходных реагентов использовались триэтилгаллий, триметилалюминий и арсин. В качестве легирующего компонента для получения n-типа проводимости применялся моносилан. Температура роста составляла 680-700°C. Типичная скорость роста для GaAs составляла 0.65 мкм/час, для AlGaAs 0.77 мкм/час.

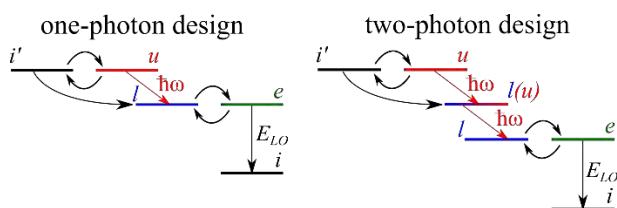


Рис. 1. Схема уровней одно- и двухфотонных дизайнов для ТГц ККЛ с резонансно-фононным опустошением

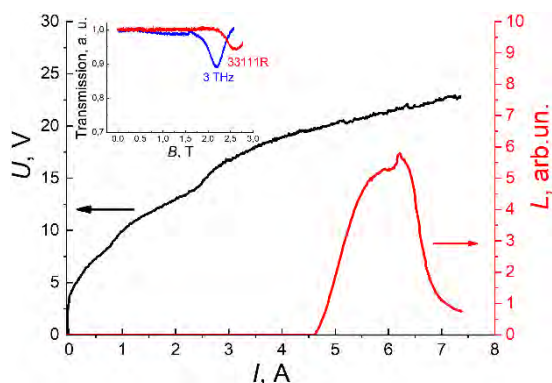


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика и зависимость интенсивности интегрального излучения от тока для ККЛ #33111R на основе структуры, выращенной МОС-гидридной эпитаксией. На вставке приведены спектры циклотронного резонанса в гетероструктуре HgTe/CdHgTe, полученные с помощью референсного 3.0 ТГц ККЛ и ККЛ #33111R

На рис. 2 приведены  $L$ - $I$ - $V$  зависимости для ККЛ #33111R, выращенного МОСГЭ, с размерами лазерного полоска 100 мкм/2 мм. Для генерации данного лазера требуются чуть большие напряжения (более 19.7 В), что соответствует ожидаемым значениям при  $V_i = 2 \cdot \hbar\omega_{ph} + E_{LO}$  на одном активном модуле. На вставке рис. 2 приведены спектры циклотронного резонанса в HgTe/CdHgTe гетероструктурах, из которых видно, что частота излучения ККЛ выше 3 ТГц.

Для более точного измерения частоты генерации изготовленных ККЛ был использован метод Фурье-

спектроскопии. На рис. 3 приведены спектры генерации двух ККЛ: #54214L (выращенный МЛЭ) и #33111R (выращенный МОСГЭ). На спектрах наблюдаются две или три линии генерации вблизи 3.8 ТГц, соответствующие продольным модам резонатора Фабри-Перо. Стоит отметить точность совпадения частоты генерации, рассчитанной при проектировании дизайна, с экспериментом. Кроме того, предложенный дизайн продемонстрировал хорошую толерантность к двум принципиально разным по физическим принципам методам роста.

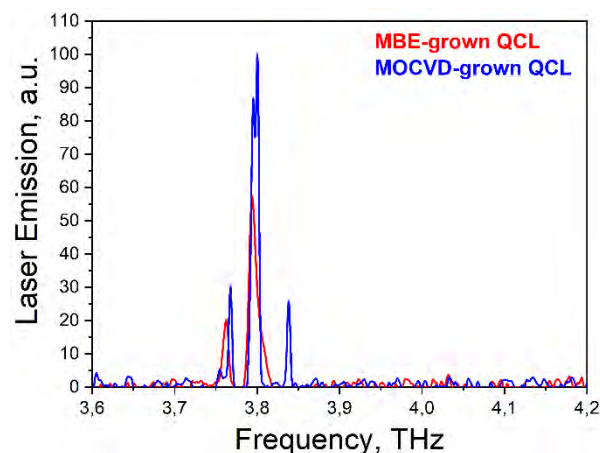


Рис. 3. Спектры излучения ККЛ #54214L (МЛЭ) и #33111R (МОСГЭ), измеренные при 30 К

При более детальном сравнении ККЛ было установлено, что лазеры на основе МЛЭ структур имеют меньшие пороговые токи, но большие рабочие напряжения по сравнению с лазерами, выращенными МОС-гидридной эпитаксией. Рабочие температуры некоторых лазеров достигали  $\sim 80$  К, при этом интенсивность излучения оставалась достаточной для измерения спектра.

Таким образом, в работе впервые продемонстрированы ТГц ККЛ с двухфотонным дизайном, выращенные МЛЭ и МОС-гидридной эпитаксией. Мы полагаем, что двухфотонный дизайн позволит улучшить характеристики низкочастотных ТГц ККЛ и увеличить мощность данных лазеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-72-30020.

## Литература

1. Р.А. Хабибуллин и др. // ФТП, V. 11, pp. 989-994 (2021).

# Моделирование неоднородностей ВАХ и пробоя в сверхрешетках с малым числом периодов

С.В. Хазанова, О.Л. Голиков, А.С. Пузанов, Е.А.Тарасова, И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, Е.С. Оболенская, А.С. Иванов, Д.Г. Павельев, С.В. Оболенский\*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*obolensk@rf.unn.ru

Теоретически и экспериментально исследованы неоднородности (ступеньки) ВАХ и процесс пробоя в сверхрешетках с малым (6-12) числом периодов. Учтены особенности влияния переходных слоев сверхрешетки, которые используются для улучшения ввода электронов в сверхрешетку на границе металлический контакт – сверхрешетка.

## Введение

Сверхрешетки (СР) с малым (6-12) числом периодов находят применение в умножителях, генераторах, смесителях и других устройствах терагерцового диапазона частот [1]. Функционирование указанных устройств в режиме большого сигнала позволяет получить максимальную мощность полезного сигнала. Явление пробоя, характеризуемое напряжением пробоя –  $U_{пр}$ , ограничивает диапазон рабочих напряжений, т.е. препятствует дальнейшему увеличению выходной мощности, поэтому исследование пробоя является актуальным [2].

Важной особенностью исследуемых в данной работе сверхрешеток является наличие переходных слоев в начале и конце сверхрешетки, которые изготавливались с целью улучшения «ввода» электронов в сверхрешетку.

## Общие положения

Для проведения исследований методом молекулярно-лучевой эпитаксии были изготовлены планарные диодные структуры на 6-ти периодной сверхрешетке, каждый период которой состоял из 4 монослоев AlAs и 18 монослоев GaAs. Площадь активной области – 1 мкм<sup>2</sup>. Для эффективного ввода электронов в СР на ее краях были сформированы переходные слои, состоящие из чередующихся слоев AlAs и GaAs с толщинами 1 × 28, 2 × 24 и 3 × 21 монослоев. Типичная экспериментальная ВАХ диодов на основе сверхрешетки с шестью AlGaAs/GaAs периодами показана на рисунке 1. В работе исследовались особенности вольт-амперной характеристики включая ступеньки и явление пробоя.

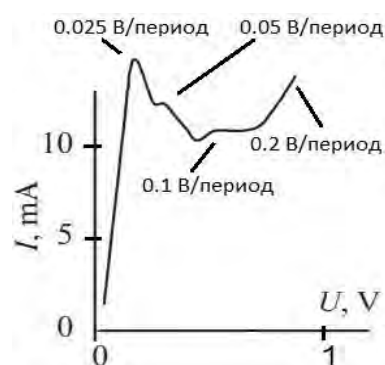


Рис. 1. Типичный вид экспериментальной ВАХ. Указаны примерные значения падения напряжения на 1 периоде сверхрешетки. Напряжение пробоя  $U_{пр} \approx 1$  В

Анализ экспериментальной ВАХ диодов показал, что в диапазоне напряжений от  $U_{пр}/3$  до  $U_{пр}$  видны характерные нарастающие ступеньки тока, которые по мере роста напряжения увеличиваются по своей величине и переходят в резкий рост тока пробоя.

В связи с тем, что диапазон указанных напряжений соответствует величинам падения напряжения на периоде сверхрешетки сопоставимым с десятками долями вольта, а высота барьера сверхрешетки составляет 0.3 эВ, то изгиб зонной диаграммы сверхрешетки достаточно велик, так что возникает возможность туннелирования электронов через первые несколько барьеров сверхрешетки в надбарьерный диапазон энергий. Тогда возможно, что по мере роста подаваемого напряжения количество барьеров, через которые туннелирует электрон, уменьшается, что и вызывает ступенчатообразное увеличение тока, а затем и пробой, возникающий из-за пере-

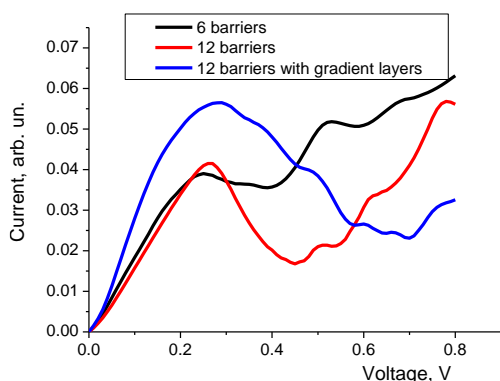
грева полупроводника протекающим током большой величины. Для проверки данного предположения проводилось моделирование.

## Модель и результаты расчетов

Численный расчет ВАХ исследуемых AlGaAs/GaAs сверхрешеток осуществляется в два этапа. Сначала, при помощи решения уравнения Шредингера с открытыми граничными условиями рассчитывался коэффициент прохождения каждой из исследуемых СР с шагом по напряжению, приложенному к СР в поперечном направлении. Затем рассчитывался туннельный ток в зависимости от внешнего электрического поля согласно следующему выражению [3]:

$$I = \frac{e}{4\pi^3 \hbar} \int_0^\infty dk_x dk_y \int_0^\infty dk_z T(E_z) [f(E) - f(E')] \frac{\partial E}{\partial k_z}$$

где  $T(E_z)$  - коэффициент прохождения,  $f(E)-f(E')$  - описывает туннелирование электронов из заполненного состояния в пустое,  $E'=E+eV$ .



**Рис. 2.** Теоретическая ВАХ диодов на основе сверхрешеток, рассчитанная с использованием выражения 1 по методу, описанному в [3]. Расчет проведен без учета и с учетом переходных периодов в начале и конце сверхрешетки. В случае учета переходных периодов предполагалось, что они состоят из чередующихся слоев AlAs и GaAs с толщинами  $1 \times 28$ ,  $2 \times 24$  и  $3 \times 21$  монослоев. Основные слои сверхрешетки состояли из чередующихся слоев AlAs и GaAs с толщинами  $4 \times 18$  монослоев

В работе был проведен расчет ВАХ диодов на основе сверхрешеток с различным количеством периодов сверхрешетки: 6 периодов без переходных периодов в начале и конце СР, 12 периодов без переходных периодов и 12 периодов с учетом переходных периодов сверхрешетки таких, как описано выше. Сопоставление результатов расчетов приведено на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 переходные слои вносят существенный вклад в ВАХ и определяют как величину отрицательной дифференциальной проводимости, так и наличие, а также форму ступенек на ВАХ вплоть до напряжения пробоя. Важно, что величины падения напряжения на периоде сверхрешетки (см. рис. 1) сопоставимы с шириной минизоны СР (0.04 эВ), так что при достижении 1-й ступеньки на ВАХ, соответствующей значению  $\approx 0.05$  В/период минизона «разрывается», что приводит к снижению тока. Дальнейший рост тока при больших напряжениях связан с формированием пробоя и является паразитным, так как подавляет отрицательную дифференциальную проводимость на ВАХ.

Диапазон токов и напряжений, при которых реализуется отрицательная дифференциальная проводимость на ВАХ значительно больше при использовании переходных периодов СР. Это позволяет увеличить выходную мощность генерируемого терагерцового сигнала.

## Заключение

Важным результатом работы является экспериментальное и теоретическое доказательство факта существенного вклада переходных слоев сверхрешетки в формирование неоднородностей (ступенек) на ВАХ, а также процесса возникновения пробоя. Одним из возможных направлений дальнейших исследований является создание диодов с набором барьеров и ям различной толщины для реализации заданного типа отрицательной дифференциальной проводимости диодов с целью улучшения их высокочастотных свойств.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057.

## Литература

1. Д.И. Дюков, А.Г. Фелелов, А.В. Коротков и др. Сравнение эффективности перспективных гетероструктурных умножительных диодов терагерцового диапазона частот /ФТП, 2020, том 54, вып. 10, стр. 1158.
2. S. L. Chuang and K. Hess Impact ionization across the conduction band edge discontinuity of quantum well heterostructures / Journal of Applied Physics 59, 2885 (1986).
3. Кардона М. Основы физики полупроводников. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 560 с.

# Расчет вольт-амперных характеристик структур на основе двуслойного графена

С.В. Хазанова<sup>1,\*</sup>, В.В. Савельев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия.

\*khazanova@phys.unn.ru

В данной работе в качестве исследуемых структур рассматривается графеновая структура с периодическим потенциалом подложки с шириной полос порядка десятой нанометра. Численно рассчитывается влияние параметра энергетической щели, угла падения, положения уровня Ферми на вольт-амперную характеристику структуры.

## Введение

Известно, что в структурах на основе графена наблюдаются различные квантовые эффекты, такие как туннелирование, осцилляции проводимости в магнитном поле. Однако недостатком изолированного монослоя графена является отсутствие ширины запрещенной зоны, необходимой для управления приборов. Многие свойства бислоя графена аналогичны свойствам монослоя, такие как отличная электропроводность при комнатной температуре, температурная подвижность до 40000 см<sup>2</sup>/В с, высокие теплопроводность, прочность и прозрачность. При этом двухслойный графен имеет особенности, которые отличают его от монослоя. Возможность обращаться к каждому слою отдельно приводит к совершенно новым функциональным возможностям двухслойного графена, включая контроль ширины запрещенной зоны примерно до 300 мэВ путем легирования или внешнего напряжения [1].

В настоящее время активно изучаются структуры, состоящих из одного или нескольких слоев графена [2], причём зонная диаграмма исследуемых структур зависит от количества слоёв (рис. 1).

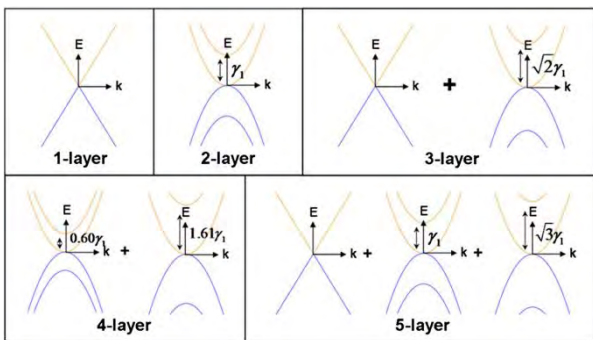


Рис. 1. Зонные структуры в зависимости от различного количества слоёв графена [3]

Создание структур на основе двуслойного графена с различной геометрией приводит к возникновению энергетической щели, подобной запрещенной зоне [3], что делает возможным реализацию приборов на его основе. При этом, наличие неоднородностей, обусловленных геометрией или потенциалом подложки, может приводить к изменению зазоров энергетического спектра.

## Метод расчёта

Известно, что энергетические состояния в графене описываются с помощью уравнения Дирака.

Решение уравнения Дирака

$$\hat{H} = v_F \vec{\sigma} \vec{p} + V(x) \hat{I}$$

можно представить в виде спиноров

$$\psi_1(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ se^{i\phi} \end{pmatrix} e^{i\lambda x}, \psi_2(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ -se^{i\phi} \end{pmatrix} e^{-i\lambda x}$$

В данной работе с помощью метода матрицы переноса для графена [4] численно рассчитывается коэффициент прозрачности. Введем матрицы, описывающие поведение волновой функции внутри барьера и на его границах:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ se^{i\phi} & -se^{-i\phi} \end{pmatrix}, T(x) = \begin{pmatrix} e^{i\lambda x} & 1 \\ 1 & e^{-i\lambda x} \end{pmatrix}$$

Используя данные матрицы и получаем результирующую матрицу переноса M(x) [4].

Вероятность прохождения через многобарьерную структуру  $T = |t|^2$  определяется диагональным элементом матрицы переноса:  $T(E) = |M_{22}|^{-2}$ .



Вольт-амперная характеристика рассчитывалась по формуле:  $I = \frac{e}{4\pi^3\hbar} \int T(E)(f(E) - f(E'))dE$

где  $f(E)$  – функция распределения,  $E'=E+eV_b$

## Результаты работы и выводы

Для различных периодических структур с 6 барьерами рассчитан коэффициент прохождения, высота барьера 2 эВ, ширина полос 0,43 нм. Далее, используя зависимости коэффициента прохождения от энергии, получена вольт-амперная характеристика (ВАХ) соответствующих структур. Рассчитана ВАХ для структуры, в которой параметр щели  $\Delta=0,1$  при разных углах падения волны (рис. 2), при уменьшении угла падения пики на ВАХ смещаются в сторону более низких напряжений.

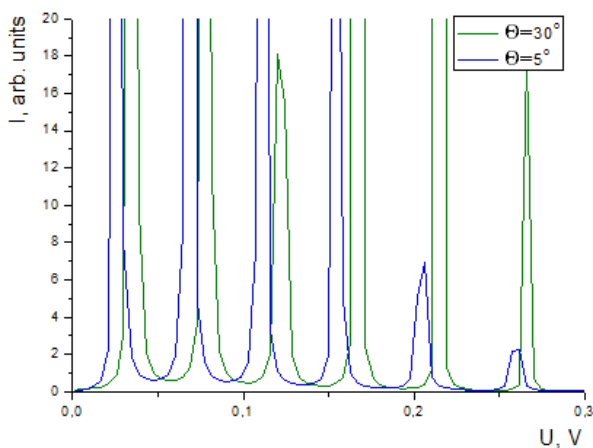


Рис. 2. ВАХ для структуры с  $\Delta=0,1$  при разных углах падения

В структурах, в которых параметр  $\Delta$  ненулевой только в области барьера, при понижении уровня Ферми на ВАХ возникают и становятся более выраженными пики (рис 3, рис. 4).

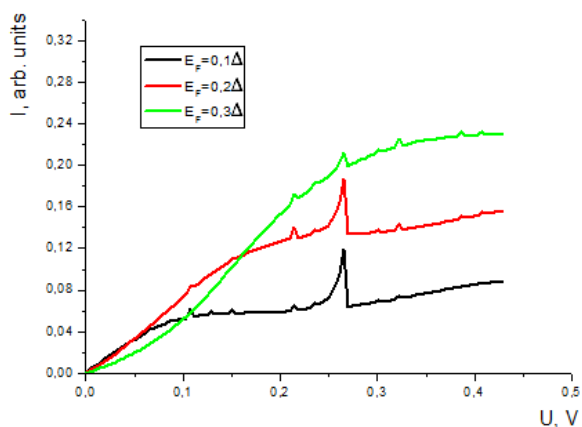


Рис. 3. ВАХ структуры с периодическим  $\Delta$  при разных уровнях Ферми ( $\Delta=1$ )

При уменьшении угла падения пики становятся более выраженными (рис. 4)

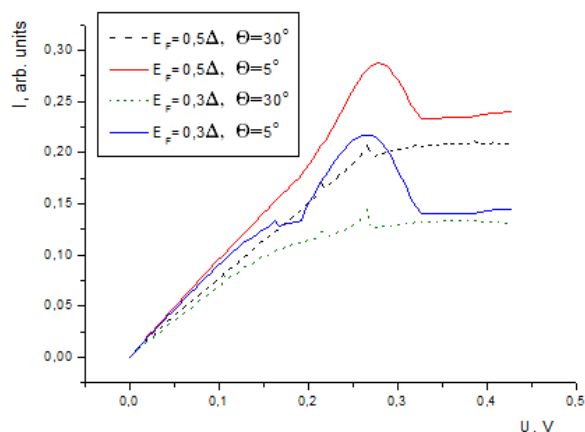


Рис. 4. ВАХ для структуры с периодическим  $\Delta$  при разных уровнях Ферми и углах падения ( $\Delta=0,5$ )

## Выводы

1. В структурах с периодическим потенциалом возникают участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. С уменьшением угла падения электронной волны максимумы ВАХ смещаются в область меньших напряжений.
2. В структурах, в которых параметр щели  $\Delta$  отличен от нуля только в области барьера, при понижении уровня Ферми на ВАХ возникают максимумы, подобные наблюдаемым при туннелировании. С уменьшением угла падения пики также становятся более выраженными.

## Литература

1. Ferrari and other, Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // *Nanoscale*, 2015. V.7, p. 4598–4810.
2. E McCann and M Koshino, The electronic properties of bilayer graphene // *Rep. Prog. Phys*, 2003. 76. P. 056503.
3. Mak et al, The evolution of electronic structure in few-layer graphene revealed by optical spectroscopy // *PNAS*, 2010. 34. P. 14999–15004
4. S. Dubey et al, Tunable Superlattice in Graphene To Control the Number of Dirac Points // *Nano Letters*, 2013. Vol. 13 p. 3990.



# Изменение показателя преломления двойных туннельно-связанных InGaAs/AlGaAs/GaAs квантовых ям под действием электрического поля

С.В. Хазанова<sup>1,\*</sup>, К.В. Сидоренко<sup>1</sup>, А.И. Бобров<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1</sup>, А.П. Горшков<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>, А.С. Панфилов<sup>1</sup>, Л.И. Юртова<sup>1</sup>, А.Н. Шушунов<sup>1</sup>, Н.А. Малехонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, физический факультет, пр. Гагарина, 23, корп.3, Нижний Новгород, 603950.

\*khazanova@phys.unn.ru

В работе описана методика проектирования и расчета АЗВ5 туннельно-связанных квантовых ям, обеспечивающая прогнозирование вариации показателя преломления в системе под действием электрического поля. Предложенный алгоритм исследования основан на совокупности теоретических и экспериментальных методов анализа.

## Введение

В настоящее время для передачи данных в оптоволоконных телекоммуникационных сетях широко используются модуляторы по схеме интерферометра Маха-Цендера. В качестве электрооптической активной среды волноводов в полупроводниковых модуляторах по схеме Маха-Цендера используются массивы напряжённых туннельно-связанных квантовых ям (ТСКЯ). Для создания последних большим потенциалом обладают полупроводники группы АЗВ5 за счёт вариации дизайна наногетероструктур в диапазоне параметров. Кроме того, данная система демонстрирует высокие частотные характеристики и миниатюрность конечных приборов [1].

Ключевой задачей проектирования полупроводниковых модуляторов по схеме Маха-Цендера является оптимизация дизайна ТСКЯ, обеспечивающая наибольшую вариацию показателя преломления в С-диапазоне длин волн прозрачности оптоволокна ( $\lambda \sim 1530 - 1565$  нм) при одновременном сохранении высоких частотных характеристик системы.

Учитывая трудоёмкость изготовления данных приборов, важным является математическое прогнозирование параметров оптически активной среды модулятора.

## Методика эксперимента

Для демонстрации предложенной в работе методики выбрана система асимметричных ТСКЯ  $\text{In}_{0,19}\text{Ga}_{0,81}\text{As}/\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{In}_{0,19}\text{Ga}_{0,81}\text{As}$  (рис. 1), изготовленная методом МОС-гидридной эпитаксии на установке AIX200RF. ТСКЯ были сформированы в зоне собственной проводимости р-і-п диода.

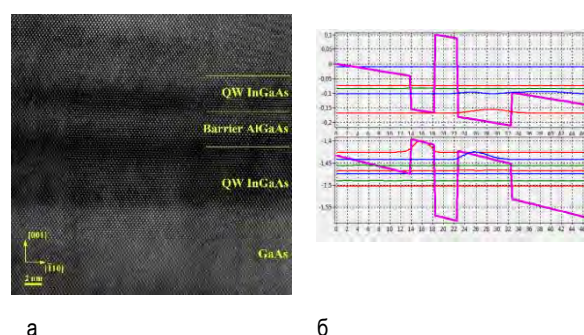


Рис. 1. а) ПЭМ-снимок ТСКЯ InGaAs/AlGaAs/GaAs в атомном разрешении и б) профиль потенциала и энергетический спектр

Спектральные зависимости поглощения исследуемой структуры регистрировались методом спектроскопии фототока, возникающего в р-і-п диоде.

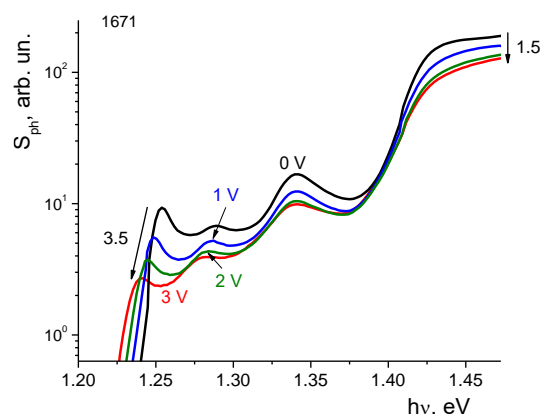


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока в области межзонного поглощения ТСКЯ, экспериментально измеренные при различных обратных смещениях на р-і-п диоде

Структура демонстрирует красное смещение экситонного пика поглощения на 25-30 meV под действием поперечного электрического поля (рис. 2).

## Методика расчета

С помощью уравнения Шредингера рассчитаны уровни размерного квантования и огибающие волновые функции в структуре. Известно, что коэффициент оптического поглощения  $\alpha(\hbar\omega)$  связан с мнимой частью диэлектрической проницаемости [2].

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{\omega}{cn} \varepsilon''(\hbar\omega)$$

Диэлектрическая проницаемость состоит из вкладов межзонных и экситонных переходов.

$$\varepsilon(\hbar\omega) = \varepsilon^{\text{band}}(\hbar\omega) + \varepsilon^{\text{ex}}(\hbar\omega)$$

$$\varepsilon^{\text{band}}(\hbar\omega) = \frac{e^2}{\varepsilon_0 m_0^2 \omega^2 L_z} \sum_{i,j} |M_b|^2 |M_{ij}|^2 \times \int_0^\infty \Gamma(\Delta E_g + E_{ei} + E_{hj} - \hbar\omega) dE$$

$L_z$ - ширина квантовой ямы,  $m_{eh}$  - приведенная эффективная масса дырки и электрона,

$E_{ei}$ ,  $E_{hj}$  - уровни размерного квантования

$|M_b|^2$  - матричный элемент блоховских состояний,

$|M_{ij}|^2 = \left| \int \psi_{ei}(z) \psi_{hj}(z) dz \right|^2$  - интеграл перекрытия огибающих волновых функций

Диэлектрическая проницаемость для экситонов:

$$\varepsilon^{\text{ex}}(\hbar\omega) = \frac{2\pi q^2}{\pi \varepsilon_0 m_0^2 \cdot L_z \omega^2} |M|^2 |M_{ij}|^2 |\varphi_{ex}(0)|^2 \Gamma(E_{ex} - \hbar\omega)$$

$\psi_{ex}(r) = \alpha \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\alpha r}$  - волновая функция двумерного экситона,  $\alpha$  - вариационный параметр, соответствующий обратному боровскому радиусу экситона. Расчет энергии связи экситона и боровского радиуса проведен вариационным методом [2].

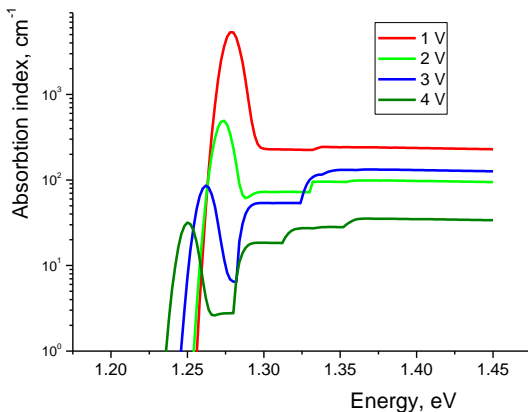


Рис. 3. Рассчитанные спектры поглощения исследуемой ТСКЯ структуры при различных напряжениях смещения

В рамках описанной процедуры были рассчитаны спектры оптического поглощения системы асимметричных двойных ТСКЯ с учетом экситонного вклада (Рис.3). Результаты показывают, что с увеличением напряженности электрического поля происходит заметное перераспределение электронной плотности в системе квантовых ям, что приводит к красному сдвигу оптического спектра, вследствие квантово-размерного эффекта Штарка.

На основании рассчитанных в широкой спектральной области показателей поглощения и соотношений Крамерса — Кронига были получены спектры изменения показателя преломления  $\Delta n(\hbar\omega)$  для различных напряжений смещения [3]. На рис. 4 показано изменение абсолютного значения показателя преломления исследуемой структуры под действием электрического поля на длине волны  $\lambda = 1550$  нм.

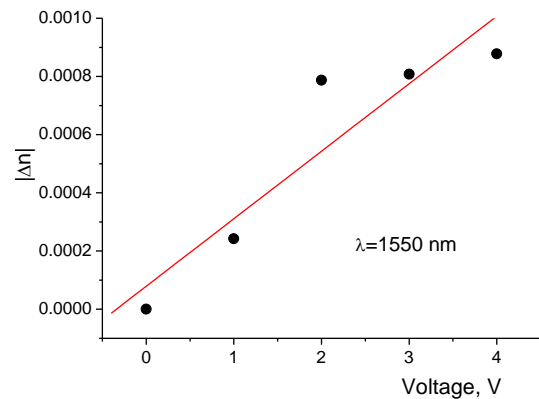


Рис. 4. Рассчитанные значения изменения показателя преломления при различных управляющих напряжениях

Таким образом, путем согласования методики математического моделирования и экспериментальных измерений продемонстрирована возможность прогнозирования вариации показателя преломления систем ТСКЯ под действием электрического поля.

## Литература

1. Guang Qian *et al.* // Chinese Optics Letters, V.17(6), 061301 (2019).
2. D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood, and C. A. Burrus, Phys.Rev. B 32, 1043 (1985)
3. Kenji Nakamura *et al.* // Journal of quantum electronics, V.28(7), 1670 (1992).

# Установка для измерений методом спектроскопии анизотропного отражения в среднем инфракрасном диапазоне

С.А. Хахулин\*, Д.Д. Фирсов<sup>§</sup>, О.С. Комков\*\*

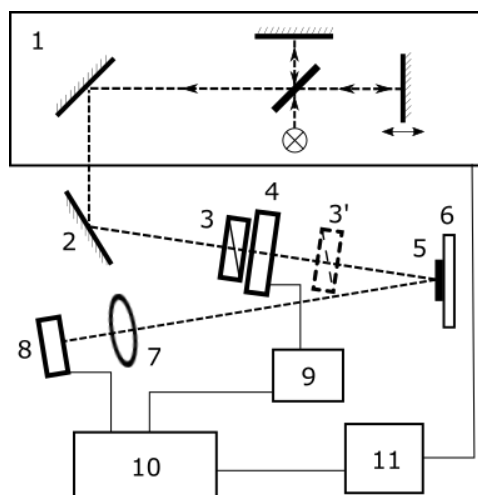
1 СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022.

\*khsmn@ya.ru, §d.d.firsov@gmail.com, \*\*okomkov@yahoo.com

Собранная на базе фурье-спектрометра экспериментальная установка анизотропного отражения позволяет регистрировать соответствующие спектры от поверхности полупроводниковых структур в широком интервале длин волн видимого и ИК-диапазона вплоть до 16 мкм. При помощи разработанного метода обработки измеряемых на фурье-спектрометре сигналов с модуляцией поляризации получаются истинные спектры анизотропного отражения, содержащие положительные и отрицательные экстремумы.

Метод оптической спектроскопии анизотропного отражения (reflectance anisotropy spectroscopy (RAS)) позволяет эффективно регистрировать отклик от нескольких приповерхностных монослоёв объёмных полупроводниковых материалов [1] и 2D структур [2] благодаря повороту направления линейной поляризации зондового излучения вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений в плоскости поверхности исследуемых образцов.

На собранной нами на базе фурье-спектрометра Vertex 80 новой установке анизотропного отражения (рисунок 1) сигналы детектируются в значительно большем интервале длин волн, чем на традиционных дифракционных спектрометрах.

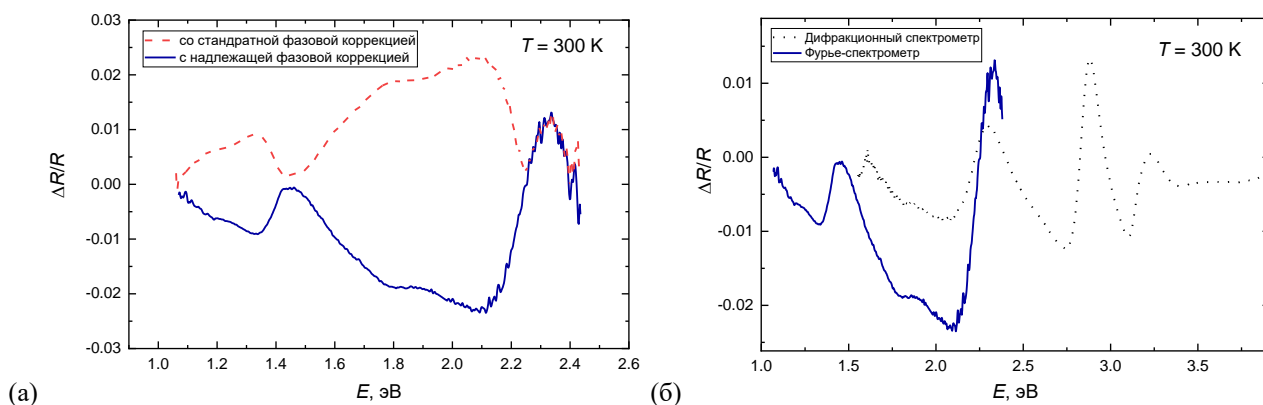


**Рис. 1.** Схема собранной установки анизотропного отражения. 1 — фурье-спектрометр, 2 — зеркало, 3 — поляризатор, 4 — фотоупругий модулятор, 5 — образец, 6 — поворотная платформа, 7 — CaF<sub>2</sub> или ZnSe оптическая линза, 8 — фотоприёмник, 9 — контроллер для управления модулятором, 10 — синхронный усилитель, 11 — компьютер

В данной схеме в качестве линейных поляризаторов используются широкополосный сеточный поляризатор с диапазоном поляризации 0,25–4 мкм, а также голографический сеточный поляризатор с рабочим диапазоном 2–20 мкм. В качестве фотоприёмников используются Si (рабочий диапазон 0,4–1,1 мкм), InSb (рабочий диапазон 1,1–5,4 мкм), а в длинноволновой области ИК-диапазона — охлаждаемый фотоприёмник на основе твёрдого раствора HgCdTe, эффективно работающий в диапазоне 2–16 мкм. Состояние поляризации зондирующего излучения модулируется при помощи фотоупругого модулятора производства Hinds Instruments с оптическим элементом из ZnSe, при помощи которого осуществляется модуляция вплоть до длины волны 18 мкм.

Модуляционные спектры содержат как положительные, так и отрицательные экстремумы, однако в получаемых при помощи фурье-спектрометра спектрах (например, в спектрах фотоотражения) без надлежащей коррекции фазы отрицательные экстремумы отсутствуют [3]. Предлагаемая нами методика обработки регистрируемых здесь сигналов позволяет корректировать соответствующую фазу, благодаря чему измеряемые на фурье-спектрометре кривые совпадают с истинными спектрами.

В качестве тестового образца использовалась эпитаксиальная структура GaSe/GaAs(001) [4, 5], сигнал RAS которой со стандартной коррекцией фазы содержит только положительные экстремумы (рис. 2(а), штриховая линия), в то время как основная часть истинного спектра находится в отрицательной области значений (спектр после описанной ниже коррекции — рис. 2(а), сплошная линия).



**Рис. 2.** (а) Спектры анизотропного отражения эпитаксиального образца GaSe/GaAs(001) со стандартной фазовой коррекцией (штриховая линия) и после надлежащей коррекции (сплошная линия). (б) Сравнение спектров RAS того же образца, полученных по традиционной схеме (пунктирная линия) и на собранной нами установке (сплошная линия)

Для коррекции фазы модуляционного сигнала  $\Delta R$ , получаемого на базе фурье-спектрометра, сначала измеряется спектр отражения  $R$  заведомо положительного сигнала, после чего находится фаза комплексного спектра  $\varphi(E) = \arctg\{\text{Im}[R(E)]/\text{Re}[R(E)]\}$ . Так как рассматриваемая фазовая ошибка определяется в первую очередь интерферометром, то её можно использовать для получения истинного модуляционного спектра  $\Delta R(E) = \text{Re}[\Delta R^*(E)e^{-i\varphi(E)}]$ , где  $\Delta R^*(E)$  — полученный из несимметричной интерферограммы комплексный спектр.

Для измерения спектра отражения  $R$  перед модулятором поляризации располагается линейный поляризатор, ориентированный под углом  $45^\circ$  к оси модулятора, после модулятора — второй поляризатор, под углом  $-45^\circ$  (его расположение обозначено в виде позиции (3') на рисунке 1). Следовательно, в данном случае при получении спектра  $R$  в качестве зондирующего луча используется та часть оптического излучения фурье-спектрометра, которая модулируется при измерениях спектров RAS благодаря наличию первого линейного поляризатора.

На рисунке 2(б) приведено сравнение спектров, измеренных на собранной нами установке (сплошная линия) и в лаборатории оптики поверхности ФТИ им. А.Ф. Иоффе на установке RAS видимого и УФ-диапазона, реализованной по традиционной схеме на базе дифракционного спектрометра. Видно, что полученный нами спектр (сплошная линия) воспроизводится по форме и по положению наблюдаемых экстремумов. При этом установка RAS видимого и УФ-диапазона имеет резкий спад чувствительности в районе 1,6 эВ, в результате чего сигнал при такой энергии «обрывается» (пунктирная линия). Использование собранной нами установки позволило полу-

чить дополнительно несколько экстремумов в районе 1,5 и 1,3 эВ. Приведённый спектр был измерен с использованием Si-фотоприёмника и CaF<sub>2</sub> светоделиителя. Фурье-спектрометр работал в режиме непрерывного сканирования подвижного зеркала интерферометра Майкельсона. Кроме того, при помощи CdHgTe фотоприёмника и KBr светоделиителя нами был получен сигнал от эпитаксиального образца InAs в диапазоне от 0,8 эВ (1,55 мкм) до 0,155 эВ (8 мкм).

Таким образом, реализованная на базе фурье-спектрометра установка анизотропного отражения позволяет измерять спектры полупроводниковых материалов и структур в широком диапазоне длин волн от видимого до средневолнового ИК. Разработанная методика обработки регистрируемых сигналов путём надлежащей коррекции их фазы позволяет получать кривые, соответствующие истинным спектрам.

Авторы выражают благодарность Сорокину С.В. и Авдиенко П.С. за предоставленные образцы GaSe/GaAs(001), а также Берковицу В.Л. за измерение спектра RAS на дифракционном спектрометре.

## Литература

1. V.L Berkovits et al. // *Semiconductors*, **54**(14), 1877 (2020).
2. O. Ruiz-Cigarrillo et al. // *Physical Review B*, **103**(3), 035309 (2021).
3. О.С. Комков // *ФТТ*, **63**(8), 991 (2021).
4. S.V. Sorokin, ..., O.S. Komkov, D.D. Firsov et al. // *Materials*, **13**(16), 3447 (2020).
5. О.С. Комков, С.А. Хахулин, Д.Д. Фирсов и др. // *ФТП*, **54**(10), 1011 (2020).

# Спин-зависимое туннелирование в двойной квантовой точке со спин-орбитальным взаимодействием в условиях ЭДСР

Д.В. Хомицкий<sup>1,\*</sup>, С.А. Студеникин<sup>2</sup>, Е.Я. Шерман<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, физический факультет, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> Emerging Technologies Division, National Research Council of Canada, Ottawa, ON K1A0R6, Canada.

<sup>3</sup> Department of Physical Chemistry, The University of the Basque Country, 48940 Leioa, Spain.

<sup>4</sup> IKERBASQUE Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain.

\*khomitsky@phys.unn.ru

Теоретически исследована эволюция дырочных состояний в двойной квантовой точке на основе GaAs при наличии сильного спин-орбитального взаимодействия и периодического электрического поля. Рассмотрены режимы туннелирования с переворотом спина в условиях электрического дипольного спинового резонанса (ЭДСР) при сильной амплитуде поля, приводящей к нелинейной картине резонанса в плоскости параметров. Обнаружены режимы, когда переворот спина локализован в одной из точек, что важно для контролируемых операций со спином.

## Введение

Проблема совместного управления пространственным движением и спином носителей заряда в гетероструктурах является актуальной на протяжении последних десятилетий. Одним из часто используемых эффектов является электрический дипольный спиновый резонанс (ЭДСР), при котором когерентная динамика спина индуцируется периодическим электрическим полем на частоте зеемановского расщепления уровней в квантовых точках (КТ) [1]. Как показывают недавние эксперименты с двойными точками на основе *p*-GaAs, между которыми происходит туннелирование в микроволновом поле [2], в такой структуре возможны нетривиальные эффекты в зависимости туннельного тока от параметров системы, в том числе от частоты и амплитуды поля.

В данном докладе мы представляем результаты теоретического исследования эволюции дырочных состояний в двойной КТ с сильным спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) в режиме ЭДСР. Параметры исследованной модели выбраны близкими к экспериментальным условиям [2]. Рассчитаны полная и спин-зависимая вероятности туннелирования. Отличительной особенностью системы является сильная пространственная неоднородность периодического электрического поля в области КТ. Также учитываются несколько орбитальных и спиновых состояний (до десяти), что может существенно изменять характер ЭДСР [3].

## Модель и основные результаты

Рассматривается модель в приближении эффективной массы для дырок в GaAs в двойной КТ. Гамильтониан системы

$$H = H_{2QD} + H_D + H_Z + H_{SO} + V(x, t) \quad (1)$$

включает одномерный потенциал двойной КТ  $H_{2QD}$ , сдвиг минимума потенциала левой КТ (detuning)  $H_D$ , зеемановское слагаемое  $H_Z$ , СОВ Дрессельхауза  $H_{SO}$  и потенциал периодического электрического поля

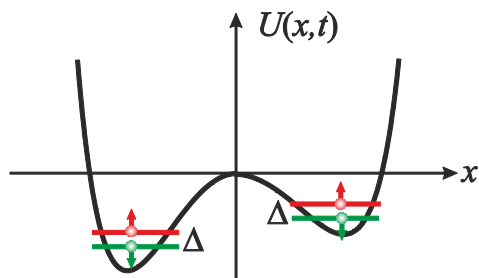
$$V(x, t) = V_d(x) \sin \omega t. \quad (2)$$

Частота поля  $\omega$  в (2) может совпадать с зеемановским расщеплением  $\Delta$  между уровнями с различной проекцией спина (с учётом поправки на СОВ от слагаемого  $H_{SO}$ ), как это показано на рис.1. В этом случае наблюдается туннелирование с переворотом спина, причём область переворота спина может находиться в разных КТ. Таким образом, возможно совместное управление положением и спином дырки, что важно для приложений.

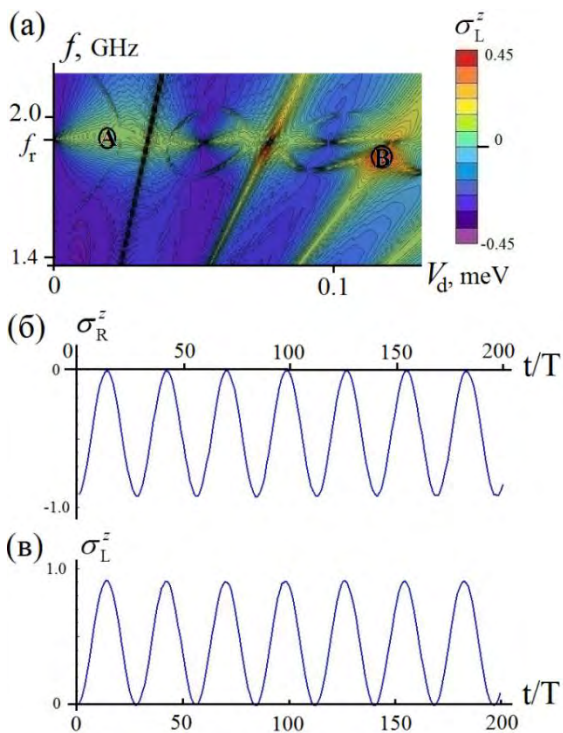
Решение нестационарного уравнения Шрёдингера с гамильтонианом (1) выполнялось численно методами Флоке на большом числе  $N$  периодов поля  $T$ . Была исследована стробоскопическая эволюция средних значений и усреднённые по многим периодам вероятности туннелирования  $P_L(NT)$  и  $z$ -проекции спина  $\sigma_L^z(NT)$  в левой КТ при началь-



ном положении частицы в правой КТ в основном состоянии со спином вниз, что близко к условиям экспериментов [2].



**Рис. 1.** Структура уровней в двойной КТ с гамильтонианом (1). Электрическое поле (2) на частоте, равной зеемановскому расщеплению  $\Delta$ , вызывает изменение профиля  $U(x, t)$  и туннелирование с переворотом спина



**Рис. 2.** (а) Усреднённые по 150 периодам поля значения  $\sigma_L^z$  в плоскости  $(f, V_d)$ . Около линии  $f = f_r$  наблюдаются области значений  $\sigma_L^z > 0$ , отвечающие перевороту спина. (б, в) Эволюция  $\sigma_R^z$  в правой КТ и  $\sigma_L^z$  в левой КТ для точки В на панели (а), отвечающей  $\sigma_R^z(t=0) \approx -1$ . При туннелировании спин переворачивается только в левой КТ, что видно по значениям  $\sigma_L^z > 0$  и  $\sigma_R^z < 0$  для всех  $t/T$

На рис.2а показаны усреднённые по  $N = 150$  значения  $\sigma_L^z$  в плоскости параметров  $(f, V_d)$ , где  $f = \omega/2\pi$

и  $V_d$  есть амплитуда поля (2). Рассмотрен случай нулевого сдвига уровней  $H_D$  и значения магнитного поля  $B_z = 0.1$  Т, что для типичного  $g$ -фактора 1.35 и амплитуды СОВ  $\beta = 3$  meV·nm отвечает резонансной частоте ЭДСР  $f_r = 1.9$  GHz. Можно видеть, что при  $f = f_r$  с ростом  $V_d$  наблюдается отчётливый переход к положительным усреднённым значениям  $\sigma_L^z$ , которые сдвигаются вниз по частоте при больших  $V_d$  вследствие нелинейного характера ЭДСР в многоуровневой системе [3]. Области с ярким цветом, отмеченные кружками А и В, отвечают перевороту спина при туннелировании. На рис.2б,в показана стробоскопическая эволюция  $\sigma^z$  в правой и левой КТ для точки В на рис.2а, рассчитанная для начального состояния, локализованного в правой КТ со спином вниз, т.е. при  $\sigma_R^z(0) \approx -1$ ,  $\sigma_L^z(0) = 0$ . При туннелировании спин полностью переворачивается именно в левой КТ, что характеризуется значениями  $\sigma_L^z > 0$  и  $\sigma_R^z < 0$  для всего времени эволюции. Полная плотность вероятности  $P_{L,R}(t)$  в каждой из КТ колеблется в фазе с  $\sigma_{L,R}^z(t)$ , что позволяет рассчитывать на возможность детектирования обеих плотностей в эксперименте.

## Выводы

Исследовано туннелирование в двойной КТ с сильным СОВ, многоуровневым спектром и большой амплитудой внешнего поля, когда ЭДСР имеет нелинейный характер. Обнаружены режимы, где переворот спина локализован в одной из квантовых точек, что важно для контролируемых операций со спином.

Работа (Д.В.Х) поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № 0729-2020-0058.

## Литература

1. E. I. Rashba and A. L. Efros // Phys. Rev. Lett. V.91, 126405 (2003).
2. A. Bogan, S. Studenikin, M. Korkusinski *et al* // Phys. Rev. Lett., V.120, 207701 (2018).
3. D.V. Khomitsky, L.V. Gulyaev, and E.Ya. Sherman // Phys. Rev. B, V.85, 125312 (2012).



# Влияние фотоэдс на фотоэмиссию из $p^+$ -GaAs(Cs,O) с положительным и отрицательным электронным сродством

В.С. Хорошилов<sup>1, 2, \*</sup>, Д.Е. Протопопов<sup>1, 2</sup>, Д.М. Казанцев<sup>1, 2</sup>, В.Л. Альперович<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090.

\*khorosvladimir@mail.ru

С помощью новой методики, основанной на влиянии поверхностной фотоэдс на квантовый выход фотоэмиссии, измерена фотоэдс на поверхности сильнолегированного  $p^+$ -GaAs ( $p \approx 6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) с адсорбированными слоями цезия и кислорода. При нанесении более 0.3 ML цезия обнаружен спад поверхностной фотоэдс, объясняемый образованием металлических кластеров цезия и ускорением поверхностной рекомбинации. При (Cs,O)-активировании поверхности обнаружены «переключения» между малой фотоэдс после нанесения цезия и большой фотоэдс после кислорода. Эти переключения так же могут быть вызваны изменением скорости поверхностной рекомбинации при формировании и разрушении цезиевых кластеров, что подтверждается измерениями интенсивности фотолюминесценции.

## Введение

Явление фотоэдс на поверхности полупроводников заключается в уменьшении поверхностного изгиба зон, которое вызвано разделением рождённых светом электрон-дырочных пар в поверхностном электрическом поле и частичной экранировкой ими этого поля. Фотоэдс ограничивает квантовую эффективность  $p^+$ -GaAs(Cs,O)-фотокатодов с отрицательным электронным сродством (ОЭС) при освещении мощными лазерными импульсами [1]. Ранее фотоэдс на поверхности  $p$ -GaAs(Cs,O) изучалась бесконтактным методом фотоотражения на UP<sup>+</sup>-структурах с тонким ( $\approx 100$  нм) нелегированным слоем [2] и на образцах с умеренным уровнем легирования  $p \approx 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [3]. При больших концентрациях дырок, изучение фотоэдс методом фотоотражения затруднено из-за малой величины сигнала. В данной работе предложена новая методика измерения поверхностной фотоэдс, с помощью которой впервые удалось измерить фотоэдс на поверхности  $p^+$ -GaAs(Cs,O) при характерном для ОЭС-фотокатодов уровне легирования  $p \approx 6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

## Методика эксперимента

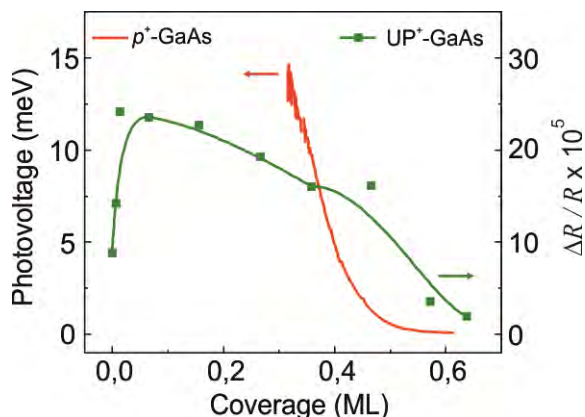
В эксперименте использовались слои сильнолегированного  $p^+$ -GaAs, выращенные методом MOCVD. Методика приготовления атомарно-чистой поверхности описана в [4]. Метод измерения поверхностной фотоэдс основан на влиянии изгиба зон на эффективное электронное сродство и, как следствие, на квантовый выход фотоэмиссии. В данной методике поверхность  $p^+$ -GaAs(Cs,O) освещается двумя

пучками света с одинаковой энергией фотонов 1.46 эВ ниже порога прямой фотоэмиссии, при этом электронное сродство поверхности должно быть достаточно низким, чтобы возник ток фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии [5]. Интенсивности пучков модулированы различными частотами  $f_1 = 1.3 \text{ кГц}$  и  $f_2 = 0.22 \text{ кГц}$ . Каждый пучок света генерирует как ток фотоэмиссии из образца, так и фотоэдс на его поверхности. Влияние фотоэдс от одного из пучков на ток фотоэмиссии от другого пучка создает суммарную и разностную гармонику  $f_1 \pm f_2$  в полном токе фотоэмиссии. Благодаря выбору одинаковых длин волн пучков, «перекрестные» эффекты влияния первого пучка на второй и второго на первый предполагаются одинаковыми, в отличие от работы [6]. Это позволяет, измерив амплитуду суммарной и разностной гармоник, определить абсолютные значения фотоэдс с использованием экспоненциальной зависимости тока фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии от эффективного электронного сродства [5]. В данной работе сумма амплитуд суммарной и разностной гармоник  $f_1 \pm f_2$  измеряется с помощью последовательного синхронного детектирования частот  $f_1$  и  $f_2$ .

## Результаты и обсуждение

С помощью предложенной методики экспериментально изучена эволюция фотоэдс при адсорбции слоёв цезия и кислорода на поверхность сильнолегированного  $p^+$ -GaAs с уровнем легирования  $p \approx 6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1). При нанесении более 0.3 ML цезия на чистую поверхность  $p^+$ -GaAs обна-

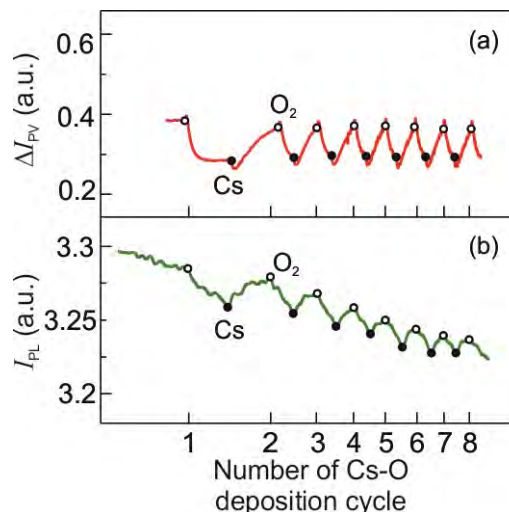
ружен монотонный спад поверхностной фотоэдс. При меньших покрытиях измерить фотоэдс не удалось из-за отсутствия сигнала фотоэмиссии. Ранее спад фотоэдс в области покрытий  $\theta > 0.3$  ML наблюдался на  $UP^+$ -структурах [2] и на образцах  $p$ -GaAs с умеренным уровнем легирования [3]. Предположительно, этот спад фотоэдс связан с формированием двумерных металлических кластеров цезия, которое приводит к росту локальной поверхностной проводимости и скорости поверхностной рекомбинации.



**Рис. 1.** Эволюция поверхностной фотоэдс при адсорбции цезия на образцы  $p^+$ -GaAs и структуры  $UP^+$ -GaAs [2]. Для  $p^+$ -GaAs показаны абсолютные значения фотоэдс, полученные с помощью новой методики, для  $UP^+$ -GaAs – амплитуда сигнала фотоотражения, пропорциональная величине фотоэдс [7]

При активировании поверхности  $p^+$ -GaAs цезием и кислородом до состояния с ОЭС обнаружены «переключения» между большой фотоэдс после нанесения слоев кислорода и малой фотоэдс после нанесения слоев цезия (рис. 2а). Поскольку при ОЭС нельзя явно разделить прямую фотоэмиссию и фотонно-усиленную термоэлектронную эмиссию и невозможно рассчитать значения самой фотоэдс, на рис. 2а показана только амплитуда сигнала  $\Delta I_{PV}$ , связанного с влиянием фотоэдс на фотоэмиссию. Ранее на  $UP^+$ -структурах и умеренно легированных образцах наблюдались похожие, но противоположно направленные «переключения» с большими значениями фотоэдс после нанесения цезия, что объяснялось Cs-индуцированным увеличением изгиба зон [2, 3]. Это отличие может свидетельствовать о том, что для фотоэдс на поверхности  $p^+$ -GaAs доминирует влияние изменений скорости поверхностной рекомбинации из-за образования и разрушения металлических кластеров цезия. При этом предполагается, что нанесение слоев кислорода

вызывает разрушение кластеров цезия, а нанесение слоев цезия – формирование новых кластеров. Эта гипотеза согласуется с наблюдаемыми в процессе активирования переключениями интенсивности фотolumинесценции  $I_{PL}$ , которая обратно пропорциональна скорости поверхностной рекомбинации (рис. 2б) [7].



**Рис. 2.** Эволюция (а) сигнала, связанного с влиянием фотоэдс на фотоэмиссию, и (б) интенсивности фотolumинесценции при активировании поверхности  $p^+$ -GaAs. Значения после нанесения цезия показаны заполненными кружками, после кислорода – пустыми

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 20-02-00355.

## Литература

1. T. Maruyama *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A 492, 199 (2002).
2. V.L. Alperovich, A.G. Paulish, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov // Appl. Phys. Lett. 66, 2122 (1995).
3. V.L. Alperovich, A.G. Paulish, A.S. Terekhov // Phys. Rev. B 50, 5480 (1994).
4. O.E. Tereshchenko, S.I. Chikichev, A.S. Terekhov // J. Vac.Sci. Technol. A 17, 2655 (1999).
5. A.G. Zhuravlev, V.S. Khoroshilov, V.L. Alperovich // Appl. Surf. Sci. 483, 895 (2019).
6. V.S. Khoroshilov, D.E. Protopopov, D.M. Kazantsev, A.G. Zhuravlev // J. Phys. Conf. Ser. 1482, 012013 (2020).
7. T. Kanata *et al.* // J. Appl. Phys. 68, 5309 (1990).

# Фотонное эхо в германии с мелкими донорами

В.В. Цыпленков<sup>1,\*</sup>, В.Н. Шастин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*Tsyplov1@yandex.ru

Работа направлена на теоретическое исследование условий наблюдения эффекта фотонного эха в кристалле германия, легированного мелкими донорами. Проведен численный расчет поляризации среды, возбуждаемой последовательностью двух оптических импульсов на частоте близкой к частоте примесного перехода. Импульсы аппроксимировались гауссовыми кривыми. Рассмотрено влияние на эхо параметров импульсов возбуждения, неоднородного уширения примесных переходов, а так же скорости релаксации населенности и когерентности в системе. Ключевым аспектом при экспериментальной реализации эффекта является понижение температуры кристалла, определяющей скорость релаксации когерентности в системе.

## Введение

Научная активность многих исследователей в настоящее время направлена на изучение квантовых оптически управляемых когерентных состояний различных систем и создания на их основе новых полупроводниковых устройств, сопряженных с развитой кремниевой и германиевой технологией. Одними из кандидатов рассматриваются кулоновские центры в полупроводниках. Хотя примесные центры в германии достаточно хорошо исследованы до сих пор нет полной информации об их временах релаксации и когерентности. Эксперимент по наблюдению фотонного эха является эффективным методом демонстрации возможности создания когерентного ансамбля диполей, образованных донорными центрами, находящимися в суперпозиции состояний, и измерению поперечного времени релаксации в системе. В настоящей работе проведено численное моделирование поляризации среды (германий с мелкими донорами), возбуждаемой последовательностью двух оптических импульсов ( $\pi/2$ - и  $\pi$ -импульсы) на частоте близкой к частоте разрешенного в электродипольном приближении перехода. Показано, что в n-Ge после воздействия  $\pi$  импульса поляризация среды начинает возрастать и через время равное времени задержки между импульсами достигает максимума.

## Теоретическая модель

Теоретическое описание строилось в рамках полуклассической модели, в которой примесный атом считался двухуровневой квантовой системой, электромагнитное поле же (два последовательных импульса электромагнитного излучения на частоте близкой к частоте атомного перехода) описывалось

классически. Использовалось приближение вращающейся волны. Если пренебречь релаксацией как населенности (продольная релаксация), так и когерентности (поперечная релаксация), то описание взаимодействия атома с полем в данном случае удобно строить, используя метод амплитуд вероятности [1]. При наличии релаксации необходимо решать уравнения либо относительно элементов матрицы плотности, либо относительно векторов Блоха [1]. Однако динамика двухуровневой системы в случае воздействия на нее двух импульсов описывается не как обычно тремя уравнениями относительно разности населенностей и вещественной и мнимой части огибающей дипольного момента, а пятью.

$$\begin{cases} N' = -\Omega_1 R_2 - \Omega_2 T_2 - \gamma_1(1 + N) \\ R_2' = N(\Omega_1 + \Omega_2 \cos\varphi) + \delta R_1 - \gamma_t R_2 \\ T_2' = N(\Omega_1 \cos\varphi + \Omega_2) + \delta T_1 - \gamma_t T_2 \\ R_1' = -N\Omega_2 \sin\varphi - \delta R_2 - \gamma_t R_1 \\ T_1' = -N\Omega_1 \sin\varphi - \delta T_2 - \gamma_t T_1 \end{cases} \quad (\Phi 1)$$

где  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  – зависящие от  $t$  частоты Раби для полей, связанных с первым и вторым импульсами,  $\delta$  – отстройка частоты излучения от частоты атомного перехода,  $\varphi$  – разность фаз излучений в первом и втором импульсах, определяемая временем задержки,  $\gamma_1$  – скорость релаксации населенности,  $\gamma_t$  – скорость релаксации когерентности. Вектора  $N_1$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  следующим образом выражаются через амплитуды вероятностей:

$$\begin{aligned} N &= a_2 a_2^* - a_1 a_1^*, \quad R_1 = a_1^* a_2 e^{i\delta t} + a_1 a_2^* e^{-i\delta t}, \quad (\Phi 2) \\ iR_2 &= a_1^* a_2 e^{i\delta t} - a_1 a_2^* e^{-i\delta t}, \quad T_1 = a_1^* a_2 e^{i(\delta t + \varphi)} + \\ &+ a_1 a_2^* e^{-i(\delta t + \varphi)}, \quad iT_2 = a_1^* a_2 e^{i(\delta t + \varphi)} - a_1 a_2^* e^{-i(\delta t + \varphi)}, \end{aligned}$$

которые определяют волновую функцию двухуровневой системы:

$$\Psi(t) = a_1(t)\varphi_1 e^{-i\omega_1 t} + a_2(t)\varphi_2 e^{-i\omega_2 t} \quad (\Phi 3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – невозмущенные полем волновые функции атома,  $\omega_1, \omega_2$  – частоты, соответствующие энергиям уровней атома. Форма импульсов излучения (следовательно,  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ ) аппроксимировались Гауссовой кривой. Дипольный момент атома выражается следующим образом:

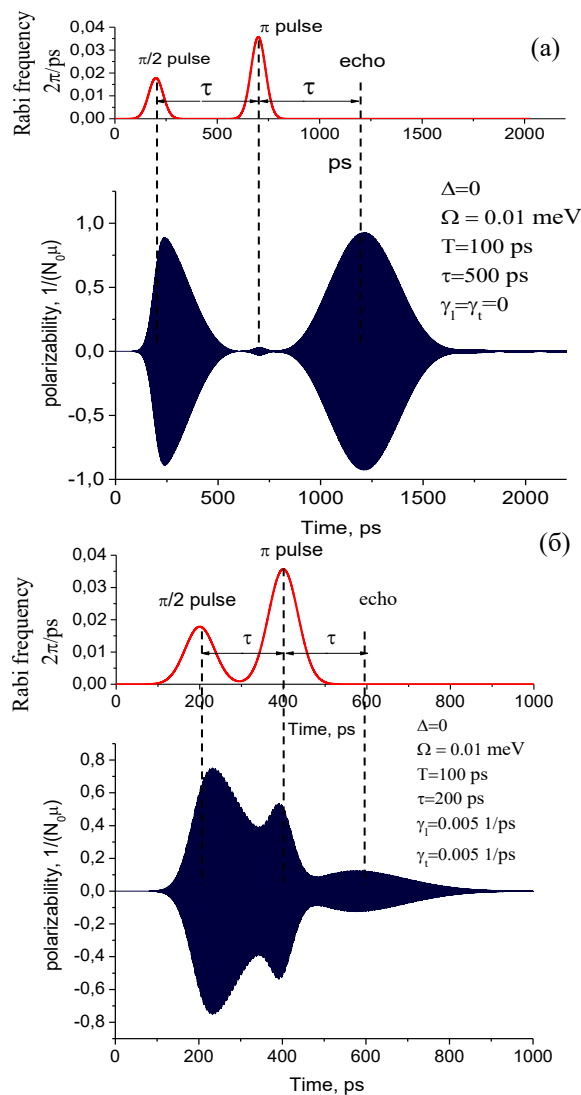
$$P = \mu(R_1 \cos \omega t - R_2 \sin \omega t) \quad (\Phi 4)$$

где  $\mu$  – матричный элемент электродипольного перехода,  $\omega$  – частота атомного перехода. Поляризуемость среды находится суммированием дипольных моментов доноров, считая, что частоты атомных переходов имеют нормальное распределение с дисперсией, соответствующей ширине неоднородно уширенного примесного перехода.

Чтобы не решать пространственную задачу, считалось, что импульсы следуют друг за другом по одной траектории. Следовательно, направление распространения эха совпадает с направлением импульсов возбуждения. Такое допущение не ограничивает общности физических выводов о зависимости эха от рассматриваемых параметров системы. На рис. 1(а, б) показаны две рассчитанные реализации динамики поляризуемости среды при различных параметрах. Рис. 1(а) демонстрирует динамику при отсутствии релаксации в среде, Рис. 1(б) – при меньшей задержке между импульсами и при наличии в среде существенной релаксации как населенности, так и когерентности. Длительность импульсов возбуждения взята соответствующей параметрам излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (NovoFEL). В зависимости от параметров системы (ширина линии, длительность импульсов, время задержки, скорости релаксации, отстройка) динамика поляризуемости может демонстрировать сложное поведение, и максимум поляризуемости после воздействия  $\pi$ -импульса может быть даже сдвинут относительно ожидаемого момента эха.

Главным препятствием для экспериментального наблюдения фотонного эха в германии при использовании NovoFEL является релаксация когерентности, которая крайне сильно зависит от температуры кристалла, которая в условиях эксперимента при воздействии излучения ЛСЭ может достигать 20-30 К. Поэтому понижение температуры является ключевой

проблемой экспериментальной реализации эффекта.



**Рис. 1.** Зависимость поляризуемости Ge:As от времени. Здесь  $\Delta$  – величина отстройки частоты излучения от частоты перехода (по центрам линий),  $\Omega$  – ширина неоднородно уширенной линии,  $T$  – длительность импульсов,  $\tau$  – время задержки,  $\gamma_l, \gamma_t$  – скорости продольной и поперечной релаксации,  $N_0$  – концентрация легирования я,  $\mu$  – матричный элемент электродипольного перехода

Работа поддержана РФФ (соглашение № 19-72-20163).

## Литература

1. М.О. Скалли, М.С. Зубайри // Квантовая оптика – М. Физматлит, 2003.

# Влияние толщины инкапсулирующих слоев на качество гетероструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов

А.В. Черненко<sup>1,\*</sup>, А.С. Бричкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела РАН, ул. Академика Осипьяна, 2, Черноголовка, 142432.

\*chernen@issp.ac.ru

Исследовано влияние толщины инкапсулирующих слоев нитрида бора на ширины линий фотолюминесценции гетероструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов. Ранее было высказано предположение, что верхний накрывающий слой нитрида бора и кремниевая подложка образуют микрорезонатор. Взаимодействие оптических мод такого микрорезонатора с экситонами в монослое дихалькогенида может привести к существенному сужению линий фотолюминесценции за счет эффекта Парселла. Измерения, выполненные на серии образцов с разной толщиной верхнего и нижнего слоев нитрида бора, а также на образцах с градиентом толщины нижнего слоя, не продемонстрировали зависимости, ожидающейся в случае взаимодействия экситонов с модами резонатора. Тем не менее козел оказалось возможным добиться сужения линий фотолюминесценции экситонов посредством увеличения толщины нижнего слоя нитрида бора.

## Введение

Создание высококачественных многослойных структур на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) является актуальной темой современной физики Ван-дер-ваальсовых материалов [1].

Качество гетероструктур на основе ДПМ, критически важное для оптических исследований, определяется ширинами линий (FWHM) фотолюминесценции (ФЛ) нейтральных и заряженных экситонов. Времена жизни экситонов в таких структурах определяется рекомбинацией и лежат в диапазоне 1-10 пс. Следовательно, однородная ширина линии ФЛ не превышает 1 мэВ. Многочисленные исследования показывают, что ширина линий фотолюминесценции монослоев ДПМ в атмосфере порядка 20-30 мэВ из-за абсорбции влаги и кислорода. Чтобы избежать уширения линий, моно- и гетерослои инкапсулируются, то есть помещаются между слоями гексагонального нитрида бора (hBN). Толщина слоев hBN может лежать в широком диапазоне, от единиц до сотен нанометров. Технологически удобно работать с инкапсулирующими слоями hBN толщиной 20-50 нм, причем верхний накрывающий слой обычно выбирается тоньше нижнего для минимизации рассеяния и поглощения излучения.

Типичная ширина линий ФЛ инкапсулированных структур при гелиевых температурах 6-14 мэВ. Неоднородное уширение может быть вызвано в первую очередь флуктуациями случайного потенциала и неоднородной деформацией. Несмотря на

все усилия по улучшению качества интерфейсов, получить линии ФЛ уже 6 мэВ на таких структурах оказывается проблематичным.

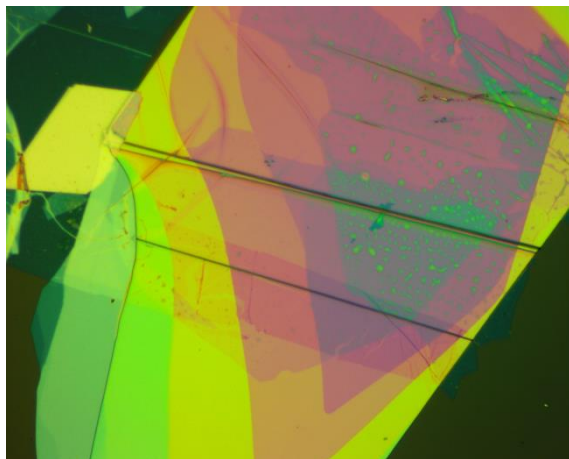
Недавно в работах [2,3] было высказано предположение, что верхний инкапсулирующий слой hBN и поверхность кремния подложки могут служить зеркалами микрорезонатора. Согласно результатам этих работ, эффект Парселла приводит к осцилляциям времени жизни 2D экситонов в монослое и, как следствие, к осцилляциям ширины линии ФЛ экситона при монотонном увеличении толщины слоя hBN. Ширина линии ФЛ осциллировала с изменением толщины нижнего слоя hBN с периодом порядка 100 нм. При этом для оценки свойств резонатора важна толщина слоя SiO<sub>2</sub>, которая в [2] была 30 нм. Минимальная ширина линии ФЛ, полученная в [2], была около 1 мэВ. Кроме того, взаимодействие экситона с модами резонатора согласно [2], приводит к смещению положения линии по шкале энергий до 10 мэВ при изменении толщины слоя hBN.

## Методика и результаты

Для того, чтобы проверить эти выводы и, возможно, добиться существенного уменьшения ширины линий ФЛ, были проведены измерения на серии образцов, содержащих инкапсулированные монослои MoSe<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub>. Образцы из серии были созданы на одинаковой подложке Si/SiO<sub>2</sub> с толщиной слоя оксида кремния 300 нм, они отличались друг от друга разной толщиной нижних слоев hBN. Кроме того, были приготовлены инкапсулирован-

ные монослои с градиентом толщины hBN, показанные на Рис.1, аналогичные использованным в работе [2].

Измерения микро ФЛ были проведены при гелиевых температурах при нерезонансном возбуждении лазерами с длинами волн 532 нм или 657 нм. Они не выявили существенной зависимости положения линии ФЛ экситонов или трионов от толщины слоя.



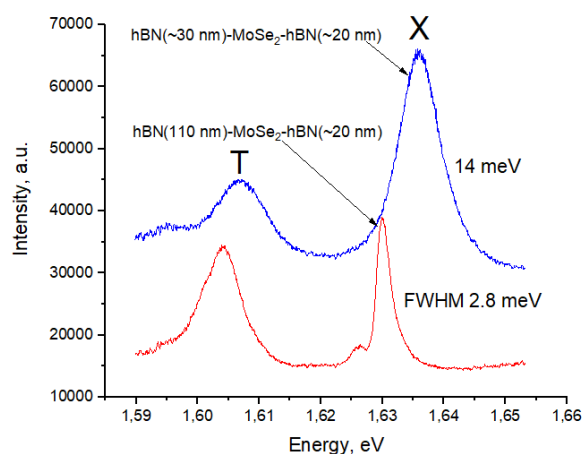
**Рис. 1** Гетероструктура hBN-WSe<sub>2</sub>-hBN, с градиентом толщины нижнего слоя hBN. Слои разной толщины хорошо различимы по цвету. Толщины слоёв меняются от 40 (салатовый) до 240 нм (сиреневый). Полный размер изображения 110x110 мкм

Отметим существенный, до 10 мэВ, разброс положения линий ФЛ образцов с близкими параметрами, то есть помещенных на одинаковую подложку и имеющих близкие толщины инкапсулирующих слоёв. Видимо, это связано с неконтролируемыми флуктуациями деформации и случайного потенциала.

Несмотря на отсутствие подтверждений выводов статьи [2], выяснилось, что можно добиться уменьшения ширины линии до ~3 мэВ при увеличении толщины слоя hBN более 100 нм (см. Рис.2). Мы можем заключить, что сужение линий ФЛ вызвано причинами, отличными от эффекта Парселла.

Скорее всего, это связано с релаксацией продольного напряжения в толстом слое hBN, хотя может быть также вызвано удалением монослоя от случайного потенциала на гетероинтерфейсе hBN-подложка.

Кроме того, были проведены измерения на серии образцов с различной толщиной верхнего инкапсулирующего слоя. Спектры ФЛ таких структур характеризуются заметным смещением положений экситонов, что связано с вариацией кулоновского взаимодействия из-за изменения экранировки, однако ширины линий ФЛ в этом случае оказались достаточно большими и не демонстрировали регулярных зависимостей от толщины слоя hBN.



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции гетероструктур hBN-MoSe<sub>2</sub>-hBN, отличающихся толщиной нижнего инкапсулирующего слоя hBN. Спектры записаны при T=2 K при разных уровнях накачки лазером с длиной волны 532 нм. Линии ФЛ экситонов и трионов обозначены как X и T, соответственно

## Литература

1. A.V.Kolobov, J. Tominaga Two-Dimensional Transition-Metal Dichalcogenides (Berlin: Springer, 2016) .
2. H.H. Fang, B. Han, C. Robert et al., Phys.Rev.Lett. 123, 067401 (2019).
3. Lei Ren, C. Robert, B. Urbaszek, et al., Comptes Rendus Physique, 22, 1, (2021).



# Оптимизация параметров ГФЭ МОС GaAs тиристорных структур, для увеличения напряжения их переключения

А.Б. Чигинева<sup>1,\*</sup>, Н.В. Байдусь<sup>1</sup>, С.М. Некоркин<sup>1,§</sup>, К.С. Жидяев<sup>1</sup>, В.А. Кукушкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23/3. Нижний Новгород, 603022.

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, д. 46, Нижний Новгород, 603950.

\*chigineva@nifti.unn.ru, §nekorkin@nifti.unn.ru

В работе исследовано влияние параметров баз на напряжение переключения GaAs тиристорных структур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что учет компенсирующих примесей в базовых слоях позволяет значительно улучшить согласие экспериментальных и расчетных значений напряжения переключения. Наличие компенсирующих фоновых примесей ограничивает возможности получения больших величин напряжения переключения тиристоров.

Тиристорные GaAs-структуры, выращенные методом газофазной МОС-гидридной эпитаксии (ГФЭ МОС), привлекают внимание исследователей с точки зрения создания низковольтных сильноточных ключей в цепях с низкоимпедансной нагрузкой [1]. При этом актуальной остается задача получения этим методом GaAs-тиристоров с напряжением переключения  $U_{\text{прк}} \sim 40$  В и более [2]. Известно, что повысить напряжение пробоя коллекторного  $p$ - $n$ -перехода и, следовательно, напряжение переключения тиристора, можно путем увеличения толщины или уменьшения степени легирования базовых областей [3]. Получение толстых слоев методом ГФЭ МОС неэффективно по сравнению, например, с жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ). Поэтому настоящая работа посвящена исследованию влияния уровня легирования баз на напряжение переключения GaAs тиристорных структур, выращенных методом ГФЭ МОС.

## Исследуемые образцы и методика эксперимента

Структуры выращивались методом ГФЭ МОС при пониженном давлении на подложках  $n^+$ -GaAs (100). Структуры представляли собой четырехслойную  $n$ - $p$ - $n$ - $p$ -конструкцию из эпитаксиальных слоев GaAs:Si ( $n$ -тип) и GaAs:C ( $p$ -тип). Параметры базовых областей структур (толщина  $h$  и концентрации свободных носителей заряда  $n$ ,  $p$ ) приведены в таблице 1. Чтобы снизить эффективную концентрацию носителей заряда в базах и повысить, таким образом, напряжение пробоя обратносмещенного коллекторного  $p$ - $n$ -перехода в структуре 4 между базо-

выми слоями была выращена прослойка нелегированного GaAs толщиной 100 нм.

Из выращенных структур были изготовлены образцы чип-тиристоров с круглыми мезаструктурами: одиночными и со сложным ступенчатым профилем [4,5]. На чипах применялись точечные (вжигание Sn) и сплошные (Au-Ge/Ni/Au) контакты. Для снижения негативного влияния поверхностных утечек по боковым стенкам мез использовались: протонная бомбардировка, обработка чипов в перекисносерном травителе, сульфидная пассивация [5]. Исследовались вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов в режиме источника напряжения.

Нами проводились теоретические расчеты параметров выращенных коммутационных структур (ВАХ и  $U_{\text{прк}}$ ). Для расчетов использовался программный комплекс, позволяющий моделировать полупроводниковые приборы, в том числе и тиристоры. Модель, использованная для расчетов, позволяла задавать не только концентрацию основной примеси (донорной или акцепторной) в каждом слое, но также и учитывать наличие фоновых примесей, частично компенсирующих основную примесь.

## Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены расчетные и экспериментальные значения напряжения переключения чип-тиристоров, полученных из структур с разной степенью легирования базовых областей. Из сравнения данных в столбцах 4 и 6 видно, что хорошее согласие теории с экспериментом наблюдается только при достаточно высокой концентрации сво-

бодных носителей заряда в базах (структура 1). Однако значение  $U_{\text{прк}}$  не превышает 27 В. Уменьшение  $n$  и  $p$  в несколько раз, согласно модельным расчетам, должно сопровождаться быстрым ростом запирающего напряжения коллекторного  $p$ - $n$ -перехода (структуры 2 и 3). Но на практике наблюдалось увеличение  $U_{\text{прк}}$  лишь на несколько вольт. Такое расхождение может быть связано с технологическими особенностями получения слаболегированных слоев методом ГФЭ МОС.

**Таблица 1.** Параметры тиристорных GaAs-структур

№	$n$ -база	$p$ -база	Расчетное знач-е $U_{\text{прк}}$ , В		Эксперим. $U_{\text{прк}}$ , В
	$h$ , мкм $n$ , $\text{см}^{-3}$	$h$ , мкм $p$ , $\text{см}^{-3}$	без учета компенс.	с учетом компенс.	
1	2	3	4	5	6
1	1,1	2,2	26	-	27
	$1,0 \times 10^{17}$	$5,0 \times 10^{16}$			
2	1,9	2,0	~ 45	26	32
	$2,0 \times 10^{16}$	$3,5 \times 10^{16}$			
3	1,9	2,2	~ 70	32,5	34
	$1,8 \times 10^{16}$	$1,3 \times 10^{16}$			
4	2,0	2,0	~ 80	50	20
	$1,5 \times 10^{16}$	$1,5 \times 10^{16}$			

Измерения эффекта Холла на пробных слоях нелегированного арсенида галлия показали концентрацию свободных носителей  $n \sim (0,3 - 1) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и подвижность порядка  $2100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при 300 К. Такое низкое значение подвижности свидетельствует о том, что суммарная концентрация фоновых доноров и акцепторов на порядок выше концентрации свободных электронов и может достигать  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  [6]. В то же время введение сравнительно небольшого количества легирующей примеси кремния (концентрация свободных электронов  $n \sim 1,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) приводит к экранированию рассеивающих центров в GaAs. В результате подвижность электронов возрастает в 2,5 раза до  $5450 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при 300 К. Однако высокая концентрация ионизованных центров приводит к снижению напряжения лавинного пробоя коллекторного  $p$ - $n$ -перехода, которое обратно пропорционально концентрации ионизированной примеси в слаболегированной области.

Результаты теоретических расчетов  $U_{\text{прк}}$  структур 2 и 3 с учетом наличия компенсирующих фоновых примесей в базах (столбец 5 в таблице 1) находятся в хорошем согласии с экспериментом. Следует отметить, что добавление нелегированной прослойки GaAs между слабо легированными базами (структура 4) не привело к ожидаемому увеличению напряжения переключения ( $\sim 50 \text{ В}$ ), что, вероятно,

связано с высокой степенью компенсации нелегированной прослойки. Поэтому согласие теории с экспериментом для структуры 4 можно улучшить, если взять более высокую степень компенсации в расчетах.

Наши экспериментальные результаты подтверждают вывод, сделанный в [4] о том, что для GaAs тиристорных структур, выращенных методом ГФЭ МОС, можно повышать напряжение переключения путем снижения лигатуры баз только до определенного уровня  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Дальнейшее снижение концентрации примесей в базах требует специальных усилий по борьбе с неконтролируемым фоновым легированием. Обычно высокие напряжения переключения GaAs-тиристорных структур получаются методом ЖФЭ [7], поскольку этот метод позволяет сравнительно легко достигать концентрацию носителей  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в сочетании большой толщиной слаболегированной  $n^0$ - базы (до 75 мкм). В работе [8] удалось получить методом ГФЭ МОС слои арсенида галлия с низкой концентрацией фоновых примесей  $(0,7-4) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и высокой подвижностью носителей заряда  $7300-8500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при 300 К только на узкоспециализированной установке из специально очищенного методом ректификации при пониженном давлении триметилгаллия.

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние параметров баз на напряжение переключения GaAs тиристорных структур. Показано, что учет компенсации легирующих примесей в базовых слоях позволяет значительно улучшить согласие экспериментальных и расчетных значений напряжения переключения.

## Литература

- Slipchenko S.O. et al. // IEEE Transact. On Electron Devices, V.67, 193 (2020).
- Багаев Т.А. и др. // XXV Междунар. симпоз. «Нанофизика и нанoeлектроника», Т.2, 570 (2021).
- Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. М. : Мир, 1984. 912 с.
- Чигинева А.Б. и др. // XXV Междунар. симпоз. «Нанофизика и нанoeлектроника», Т.2, 915 (2021).
- Чигинева А.Б. и др. // ФТП, Т.56, вып.1, С.134-138 (2022).
- Rode, D.L., Semiconductors and Semimetals, Academic Press, N.Y., V.10, 1 (1975).
- Алферов Ж.И. и др. // Письма ЖТФ, Т.5, 916 (1979).
- Ревин М.В. и др. // Изв. Вузов. Электроника, Т.23, №3, 240 (2018).

# Динамическая спиновая поляризация электронов

Т.С. Шамирзаев<sup>1,\*</sup>, Д.С. Смирнов<sup>3</sup>, А.В. Шумилин<sup>3</sup>, Д.Р. Яковлев<sup>2,3</sup>, М. Bayer<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup> Experimental Physics 2, TU Dortmund University, Dortmund, Germany, 44221

<sup>3</sup> ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ул. Политехническая 26, С.-Петербург, 194021

\*tim@isp.nsc.ru

Обнаружен новый механизм спиновой ориентации локализованных электронов: динамическая спиновая поляризация электронов при взаимодействии с флуктуациями ядерного спина. Показано, что флуктуации ядерного спина могут быть использованы для поляризации углового момента электронов через сверхтонкое взаимодействие в слабом магнитном поле.

## Введение

Существует два хорошо известных подхода к ориентации спинов в полупроводниковых наноструктурах: оптическая ориентация спинов [1] и термическая поляризация спинов в сильном магнитном поле [2]. Первый подход основан на передаче углового момента от фотонов с циркулярной поляризацией к электронам посредством спин-орбитального взаимодействия. Второй подход требует понижения температуры решетки, так что тепловая энергия становится меньше, чем электронное Зеемановское расщепление. Мы сообщаем о новом механизме ориентации спина локализованных электронов - динамической спиновой поляризации электрона. В отличие от оптической ориентации спина открытый нами механизм не требует циркулярной поляризации оптического возбуждения, а в отличие от тепловой спиновой поляризации, поляризация спина имеет место в слабых магнитных полях, для которых электронное Зеемановское расщепление много меньше тепловой энергии. В данном докладе рассматривается динамическая спиновая поляризация электрона в составе экситона в непрямозонных квантовых точках (In,Al)As/AlAs.

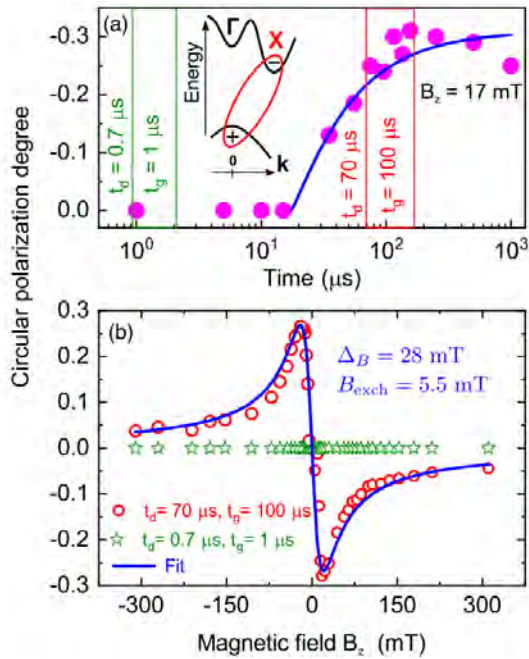
## Методика эксперимента

Исследуемые КТ (In,Al)As в матрице AlAs, были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Температура для всех экспериментов была  $T = 1,8$  К. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась нерезонансно, с энергией фотонов превышающей ширину прямой запрещенной зоны матрицы AlAs, равной 3,099 эВ. Для возбуждения ФЛ использовалась третья гармоника Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> им-

пульсного лазера с энергией фотонов 3.49 эВ, длительностью импульса 5 ns и частотой повторения 1 кГц. Временная задержка между импульсом накачки и началом регистрации ФЛ  $t_d$  варьировалась от нуля до 1 мс. Длительность регистрации ФЛ,  $t_g$ , варьировалась от 1 нс до 1 мс. Интенсивность сигнала и временное разрешение установки изменялись в зависимости от  $t_d$  и  $t_g$ .

## Результаты и выводы

Экситон, локализованный в КТ, формируется из электрона с проекцией спина на ось роста  $S_z = \pm 1/2$  и тяжелой дырки с проекциями спина  $J_z = \pm 3/2$ . Таким образом, образуются четыре экситонных состояния со спином  $F_z = \pm 1$  и  $\pm 2$ . Обменное взаимодействие расщепляет эти экситонные состояния на  $\delta_0$ . Два верхних светлых состояния имеют спин  $F_z = \pm 1$ , а нижние темные  $F_z = \pm 2$ . Светлые экситоны могут излучательно рекомбинировать и имеют время жизни  $\tau_b$ , в то время как излучательная рекомбинация темных экситонов запрещена по спину. Темные экситоны могут рекомбинировать путем смешивания со светлыми, поэтому их излучательная рекомбинация происходит при переходах из темного состояния в светлое. Из-за этих оптических правил отбора преимущественно заселяются темные экситонные состояния. В нулевом магнитном поле расщепления между темным и светлым состояниями с  $F_z = +1$  и  $+2$  или  $F_z = -1$  и  $-2$  равны. Однако в продольном магнитном поле  $B_z$  расщепление между темным и светлым состояниями с положительными и отрицательными проекциями спина становятся разными, поэтому переходы из темного состояния в светлое в разных парах происходят с разной скоростью.



**Рис. 1.** (а) Динамика степени циркулярной поляризации ФЛ, измеренная при  $B_z = 17$  мТл и  $T = 2$  К; время интегрирования 5 мкс. Вертикальными линиями показаны окна интегрирования по времени для панели (б). (Вставка) Зонная диаграмма непрямозонных (In,Al)As/AlAs КТ. (б) Зависимости степени поляризации от магнитного поля, измеренные при  $t_d = 0,7$  (зеленые звезды) и  $t_d = 70$  мкс (красные кружки) с окнами интегрирования  $t_g = 1$  и  $t_g = 100$  мкс соответственно. Синяя линия соответствует уравнению 1 с  $\Delta_B = 28$  и  $B_{\text{exch}} = 5,5$  мТл

В результате заселенность светлых состояний с  $F_z = +1$  и  $-1$  становится неодинаковой. Теоретический расчет дает степень поляризации электрона в экситоне [3]:

$$P_e = \frac{-2B_z B_{\text{exch}}}{B_{\text{exch}}^2 + \Delta_B^2 + B_z^2} \quad (1)$$

где  $B_{\text{exch}}$  пропорционально силе электрон-дырочного обмена, а  $\Delta_B$  - типичное поле Оверхаузера случайно ориентированных ядерных спинов.

Эксперименты проводились в непрямозонных квантовых точках (In,Al)As/AlAs. Измерялась циркулярная поляризация разрешенной по времени фотолуминесценции после нерезонансного и неполяризованного импульсного оптического возбуждения. Для того чтобы динамически поляризовать электронные спины, КТ помещались в продольное магнитное поле 17 мТл (геометрия Фарадея). На рисунке 1(а) показана зависимость циркулярной поляризации ФЛ от времени. Степень поляризации

определялась как  $P_e = (\Gamma^+ - \Gamma^-) / (\Gamma^+ + \Gamma^-)$ , где  $\Gamma^{\pm}$  - интенсивности  $\sigma^{\pm}$  поляризованного излучения. Поляризация появляется с задержкой 15 мкс после импульса возбуждения и достигает насыщения через 100 мкс. Это соответствует предсказанию модели о том, что динамическая поляризация появляется только после рекомбинации светлых экситонов. Зависимость динамической поляризации, проинтегрированной в двух временных окнах, от магнитного поля показана на рисунке 1 (б). Абсолютное значение  $P_e(B_z)$  увеличивается в слабых полях, достигает максимума (около 0,3 при  $B_z = 17$  мТл), а затем постепенно уменьшается, стремясь к нулю в сильных полях. Аппроксимируя эту зависимость выражением (1), мы определили два параметра:  $\Delta_B = 28$  и  $B_{\text{exch}} = 5,5$  мТл. Амплитуда сверхтонкого взаимодействия хорошо согласуется с измеренной в аналогичном образце [4], что подтверждает нашу интерпретацию. Поскольку g-фактор электрона в X долине зоны проводимости  $g_c = 2$ , расщепление между светлым и темным состояниями  $\delta_0 = 0,6$  мкэВ.

Таким образом, обнаружен новый механизм спиновой ориентации локализованных электронов: динамическая спиновая поляризация электронов, обеспечиваемая флуктуациями спина ядра. Динамическая спиновая поляризация электронов имеет следующие преимущества: (i) требует слабых магнитных полей, которые можно легко модулировать; (ii) использует нерезонансное и неполяризованное оптическое возбуждение; (iii) не зависит от температуры, пока в спиновой релаксации преобладает сверхтонкое взаимодействие; (iv) возможна 100 %-ная спиновая поляризация электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Deutsche Forschungsgemeinschaft проект № 409810106 и РФФИ, проект № 19-52-12001.

## Литература

1. Optical Orientation. ed. by F. Meier, B.P. Zakharchenya (North Holland, Amsterdam 1984).
2. E. L. Ivchenko, // Physics of Solid State V.60, 1514 (2018).
3. D. S. Smirnov, *et al* // Physical Review Letters V.125, 156801 (2020).
4. J. Rautert, *et al* // Physical Review B V.99, 195411 (2019).

# Исследование влияния дозы ионно-лучевой обработки поверхности Si(111) на процессы роста нитевидных нанокристаллов GaAs

Н.А. Шандыба<sup>1,\*</sup>, Н.Е. Черненко<sup>1</sup>, С.В. Балакирев<sup>1</sup>, М.М. Ерёменко<sup>1</sup>, Д.В. Кириченко<sup>1</sup>, М.С. Солодовник<sup>1,§</sup>

<sup>1</sup> Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного Федерального Университета, ул. Шевченко, 2, Таганрог, 347922.

\*shandyba@sfedu.ru, §solodovnikms@sfedu.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния дозы ионно-лучевой обработки поверхности Si(111) на процессы роста нитевидных нанокристаллов GaAs. Выявлено резкое различие между нитевидными нанокристаллами, сформированными на модифицированных и немодифицированных участках подложки Si. Показано, что изменение дозы имплантации ионов Ga<sup>+</sup> от 0,052 до 10,4 пКл/мкм<sup>2</sup> позволяет варьировать параметры (плотность, диаметр и т. д.) массива нитевидных нанокристаллов в широком диапазоне условий в едином технологическом цикле. Представлены основные закономерности, которые отображают нелинейную зависимость параметров сформированных структур от дозы имплантации ионов.

## Введение

На сегодняшний день синтез нитевидных нанокристаллов (ННК) является одной из активно развивающихся технологий благодаря наличию уникальных электронных, оптических, механических и магнитных свойств у материалов и структур на основе данных объектов. Но вопрос эффективного управления различными параметрами ННК (длиной, диаметром, плотностью и т. д.), в т.ч. посредством предростовой подготовки поверхности, остается актуальным до сих пор. Применение традиционных технологических процессов на основе операций оптической литографии, жидкостного и плазменного травления либо не обеспечивают требуемых параметров получаемых структур, либо слабо совместимы с ростовыми процессами, либо отличаются высокой себестоимостью предростовой обработки. В то же время технология фокусированных ионных пучков (ФИП) позволяет проводить технологические операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения материалов с высоким пространственным разрешением в условиях высокого вакуума, без необходимости применения резистов, масок и химических травителей.

Целью данной работы является исследование влияния дозы ионно-лучевой обработки поверхности Si(111) на процессы роста нитевидных нанокристаллов и возможности использования данного метода для управления их параметрами.

## Методика эксперимента

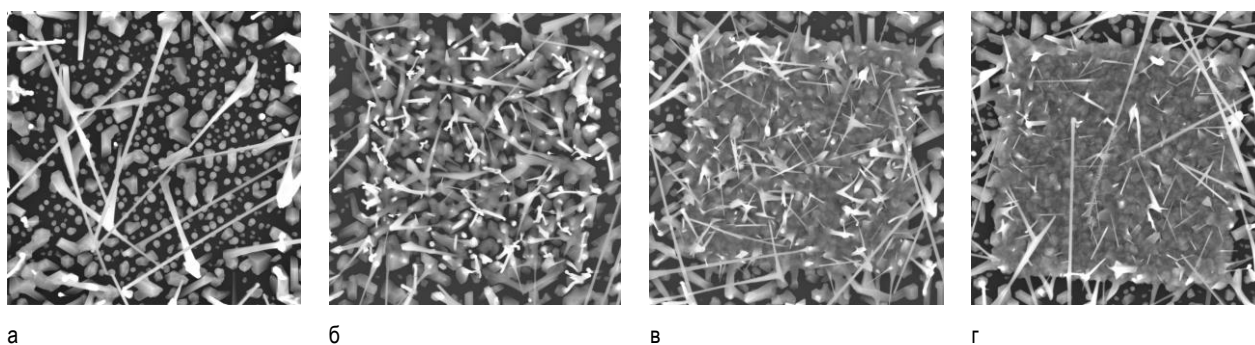
ФИП-обработка поверхности Si(111) проводилась с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Nova NanoLab 600, оснащенного системой ФИП (с источником ионов Ga<sup>+</sup>). Эпитаксиальный рост ННК выполнялся на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) SemiTEq STE 35 с твердотельными источниками металлов III группы и примесей и вентильным источником мышьяка.

На первом этапе работы проводилась ионно-лучевая обработка поверхности Si(111) с использованием квадратного шаблона с размерами 5x5 мкм. Модификация поверхности выполнялась при ускоряющем напряжении 30 кВ и дозе имплантации, изменяющейся от 0,052 до 10,4 пКл/мкм<sup>2</sup>. Затем модифицированный образец помещался в ростовую камеру установки МЛЭ. После предварительного отжига проводился рост GaAs ННК при температуре 600°C с эффективной скоростью осаждения галлия 0,25 МС/с и эквивалентной толщиной осаждения GaAs 200 нм в мышьяк-обогащенных условиях.

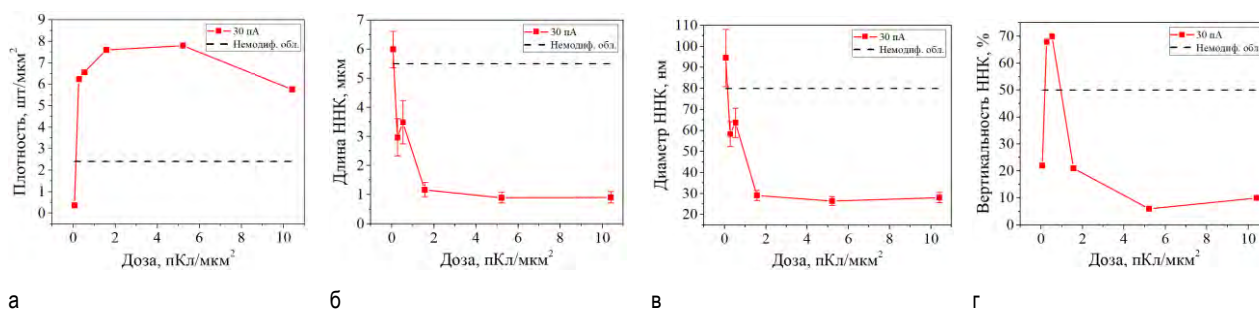
## Результаты и обсуждение

Анализ полученных РЭМ изображений (рисунок 1) показывает резкое различие между ННК, сформированными на модифицированных и немодифицированных участках Si, а также нелинейную зависимость параметров ННК от дозы имплантации ионов Ga<sup>+</sup> в подложку (рисунок 2).





**Рис. 1.** РЭМ-изображения массивов ННК GaAs на участках с различной дозой имплантации: (а) 0,052 пКл/мкм<sup>2</sup>, (б) 0,26 пКл/мкм<sup>2</sup>, (в) 1,56 пКл/мкм<sup>2</sup>, (г) 10,4 пКл/мкм<sup>2</sup>



**Рис. 2.** Зависимости (а) плотности, (б) длины, (в) диаметра и (г) вертикальности ННК GaAs от дозы

Так, на участке с дозой облучения 0,052 пКл/мкм<sup>2</sup> (рисунок 1а) наблюдается практически полное подавление роста ННК. При увеличении дозы до 0,26 пКл/мкм<sup>2</sup> (рисунок 1б) начинается активный рост ННК на модифицированных областях, что соответствует резкому увеличению плотности ННК при одновременном снижении их длины и диаметра (рисунок 2б, в) относительно ННК на немодифицированной поверхности. Дальнейшее увеличение дозы ионной имплантации сначала ведет к увеличению плотности ННК (рисунок 2а) с пиковым значением 7,8 шт/мкм<sup>2</sup>, соответствующим дозе 5,21 пКл/мкм<sup>2</sup>, а затем к незначительному снижению до 5,76 шт/мкм<sup>2</sup> (рисунок 1г). Во всем диапазоне значений доз (кроме первой точки) плотность ННК более чем в 2 раза превышает плотность на немодифицированной поверхности. Анализ морфологии также показал, что начиная с дозы 1,56 пКл/мкм<sup>2</sup> (рисунок 1в) на модифицированных участках наряду с ННК формируется сплошное поликристаллическое основание. При этом меняется и характер растущих ННК: плотность начинает снижаться при практически неизменных (на уровне погрешности) значениях их длины и диаметра. Это может говорить о смене условий нуклеации и роста ННК на данных участках.

Также была обнаружена немонотонная зависимость вертикальности ННК от параметров ионно-лучевой обработки. Как видно из рисунка 2г наибольший процент вертикально-ориентированных ННК, равный 70 %, имеет область с дозой имплантации 0,52 пКл/мкм<sup>2</sup>.

## Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что управление различными параметрами ННК методом ФИП возможно посредством варьирования дозы имплантации ионов Ga<sup>+</sup> в подложку Si(111). Выявлено резкое различие между массивами ННК, сформированными на модифицированных и немодифицированных участках подложки Si. Показано, что изменение дозы имплантации ионов Ga<sup>+</sup> от 0,052 до 10,4 пКл/мкм<sup>2</sup> позволяет регулировать длину ННК в диапазоне 1 – 6 мкм, плотность – 0 – 7,8 шт/мкм<sup>2</sup>, диаметр 28 – 95 нм, вертикальность – 5 – 70%.

## Благодарности

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации; Государственное задание в области научной деятельности № FENW-2022-0001.



# Влияние одноосной деформации кристалла на стимулированное излучение оптически возбуждаемых доноров V группы в кремнии

В.Н. Шастин<sup>1,\*</sup>, Р.Х. Жукавин<sup>1,§</sup>, К.А. Ковалевский<sup>1</sup>, С.Г. Павлов<sup>2</sup>, N. Deßmann<sup>3</sup>, A. Pohl<sup>2,4</sup>, В.В. Цыпленков<sup>1</sup>, Н.В. Абросимов<sup>5</sup>, H. Riemann<sup>5</sup>, Н.-W. Hübers<sup>2,4</sup>

1 Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, Россия, 607680.

2 Institute of Optical Sensor Systems, German Aerospace Center (DLR), Rutherfordstr., 2, Berlin, Germany, 12489.

3 FELIX Laboratory, Radboud University Nijmegen, Toernooiveld 7c Nijmegen, The Netherlands, 6525 ED.

4 Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin, Newtonstr., 15, Berlin, Germany, 12489.

5 Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Max-Born-Str., 2, Berlin, Germany, 12489.

\*shastin@ipmras.ru, §zhur@ipmras.ru

Обнаружено стимулированное излучение в диапазоне 3.6-6.1 ТГц из оптически накачиваемого кремния, легированного висмутом (Si:Bi) при деформации кристалла вдоль направлений [001] и [011]. Частота излучения обусловлена механизмом вынужденного комбинационного рассеяния света и соответствуют внутрицентровым переходам типа  $2p \rightarrow 1s$ . Теоретический анализ инверсионного и безинверсионного механизмов генерации указывает на доминирование последнего в диапазоне использованной одноосной деформации при внутрицентровом фотовозбуждении Si:Bi.

## Введение

Возможность перестройки частоты излучения оптически накачиваемых внутрицентровых кремниевых лазеров (например за счет приложенных внешних полей) зависит от типа возбуждения и механизма стимулированного излучения. При возбуждении CO<sub>2</sub> лазером (ионизация доноров), лазерный эффект создается за счет инвертированных населенностей уровней, разница энергий которых не зависит от величины одноосной деформации кристалла кремния. Система донорных уровней позволяет получить перестройку энергии кванта излучения при приложении одноосной деформации в случае реализации механизма-вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) при внутрицентровом резонансом возбуждении доноров пятой группы.

## Вынужденное комбинационное рассеяние света в Si:Bi

Образцы были вырезаны из слитков легированного висмутом кремния с концентрацией доноров  $\sim 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , выращенного методом зонной плавки с пьедестала, и изготовлены в форме прямоугольного параллелепипеда с полированными гранями, так чтобы он представлял собой резонатор на модах полного внутреннего отражения. Размеры образцов составляли  $3 \times 5 \times 7 \text{ мм}^3$ , длинная сторона образцов ориентирована вдоль кристаллографического направления [001] и [110]. Образцы помещались в

специально разработанную криогенную вставку, позволяющую прилагать давление к образцу, которая, в свою очередь, погружалась в транспортный сосуд Дьюара. В качестве детектора ИК-излучения использовался фотоприемник на основе охлаждаемого жидким гелием германия, легированного галлием (Ge:Ga). Для блокировки излучения накачки перед детектором ставился кристаллический кварц при комнатной температуре. Эксперименты по наблюдению лазерного эффекта проводились с использованием лазера на свободных электронах (ЛСЭ) FELIX (Radboud University, Nijmegen, Нидерланды). Импульсы накачки представляли собой макроимпульсы длительностью 6 мкс, следующие с частотой 10 Гц. Каждый макроимпульс состоит из микроимпульсов длительностью  $\sim 10 \text{ пс}$  мощностью до 10 МВт, разделенных временным интервалом 1 нс. Спектр излучения измерялся с помощью Фурье-спектрометра на основе пошагово-сканирующего интерферометра Майкельсона со спектральным разрешением  $0.2 \text{ см}^{-1}$  и сопряженного с фотодетектором Ge:Ga (полоса чувствительности с учетом фильтра 2.5-7.5 ТГц, 40–120 мкм).

Проведенные эксперименты при деформации кристалла вдоль [001] и [011] позволили обнаружить ТГц излучение из Si:Bi, имеющее пороговую зависимость от интенсивности накачки, что подтверждает его стимулированный характер. Величина пороговой интенсивности зависит от энергии кванта возбуждения, направления и величины одноос-

ной деформации  $S$  и варьируется в диапазоне 10–100 киловатт (пиковая мощность в микроимпульсе). При  $S \parallel [011]$  получена перестройка частоты излучения на переходе  $2p_{\pm}^{\text{lower}} \rightarrow 1s(A_1^{\text{upper}})$  в диапазоне 192–205  $\text{см}^{-1}$ . Кроме того, в спектре стимулированного излучения присутствуют линии, соответствующие переходам  $2p_{\pm}^{\text{lower}} \rightarrow 1s(B_1)$  (192  $\text{см}^{-1}$ ) и  $2p_0^{\text{lower}} \rightarrow 1s(B_1)$  (145  $\text{см}^{-1}$ ) также связанные с ВКР на примесных переходах. В отсутствие деформации спектр возбуждения соответствует переходу  $1s(A_1) \rightarrow 2p_0$  или  $\rightarrow 2p_{\pm}$ , а спектр излучения соответствует переходам  $2p_0 \rightarrow$ ,  $2p_{\pm} \rightarrow 1s(E)$ . Ограниченный спектр возбуждения в проведенных экспериментах вызван относительно небольшой мощностью возбуждения и потерями в тракте. В такой системе возможно наблюдение ВКР генерации в диапазоне квантов накачки 59–65 мэВ (14.3–15.8 ТГц) [1]. Сопоставление результатов измерений спектров излучения со спектрами возбуждения позволяет констатировать, что одноосное давление приводит к появлению двух стоков сдвигов за счет расщепления уровня донора  $1s(E)$ , который определяет стоков сдвиг в данной системе. При направлении оси давления вдоль [110], энергия связи компоненты  $1s(B_1)$  этого уровня не меняется, так как он движется параллельно нижним долинам зоны проводимости, в то время как энергия второй компоненты  $1s(A_1^{\text{upper}})$  имеет нелинейную зависимость от  $S$ . В первом случае матричные элементы перехода  $\rightarrow 1s(B_1)$  отличны от нуля для переходов из нижних компонент уровней  $p$ -типа, а во втором, возможны переходы  $\rightarrow 1s(A_1^{\text{upper}})$  как из верхних, так и из нижних компонент уровней  $p$ -типа ввиду наличия вкладов соответствующих долин в разложении волновых функций  $1s$ . По сравнению со случаем деформации параллельно [100], где частота резонансного перехода между  $2p^{\text{lower}} \rightarrow 1s(A_1^{\text{upper}})$  уменьшается при увеличении давления, в случае [110] частота излучения на переходе  $2p^{\text{upper}} \rightarrow 1s(A_1^{\text{upper}})$  растет с увеличением давления. Хотя, теоретически, эффективность перехода  $2p_{\pm}^{\text{upper}} \rightarrow 1s(A_1^{\text{upper}})$  для [110] или  $2p_{\pm}^{\text{lower}} \rightarrow 1s(A_1^{\text{upper}})$  для [001] позволяет соответственно увеличивать или уменьшать частоту в достаточно широких пределах, несмотря на падение матричных элементов, в эксперименте максимальная частота стимулированного излучения оказалась  $\sim 205 \text{ см}^{-1}$  (Рис. 1) для направления [011], а минимальная частота перехода для направления [001] -  $\sim 120 \text{ см}^{-1}$ . В эксперименте при давлении вдоль

[011] не было обнаружено излучение на переходе из  $2p_0^{\text{upper}}$ , что, возможно, связано со входом этой компоненты в резонанс с междолинными оптическими фононами. В проведенных экспериментах переходы в  $1s(T_2^{\text{lower}})$  (наличие которых указывало бы на инверсионный механизм) не наблюдались, по-видимому, из-за резонансов с междолинными оптическими фононами [2]. Действительно, эксперименты при фотоионизации донора [3] показали, что для давления вдоль [110] эффективность лазерной генерации сильно падает при приложении давления. В работе [1] было показано, что в случае недеформированного Si:Bi и резонансной накачки нечетных состояний реализуется конкуренция двух механизмов генерации: инверсионного и ВКР. При превышении порога ВКР, последний подавляет инверсионный механизм генерации, даже в случае значительной временной задержки в развитии. Режим ВКР относительно устойчив по отношению к неоднородному уширению линий переходов, вызванному зависимостью энергии связи основного состояния донора  $1s(A_1^{\text{lower}})$  и  $1s(A_1^{\text{upper}})$  от величины давления.

Выполнено при поддержке РФФИ (№19-72-20163).

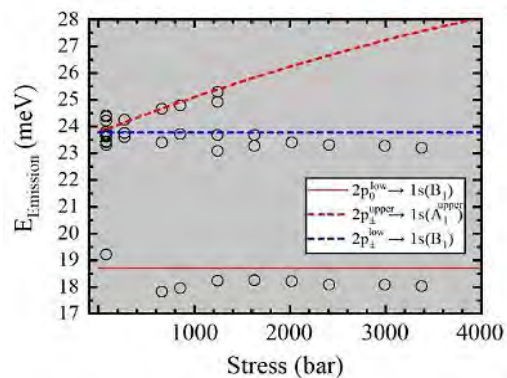


Рис. 1. Зависимость энергии кванта излучения от деформации вдоль [110]

## Литература

1. S.G. Pavlov, N. Deßmann, B. Redlich *et al.* // Phys. Rev. X, v. 8, 041003 (2018).
2. В.В. Цыпленков, Р.Х. Жукавин, В.Н. Шагин // ФТП, т. 48, 1044 (2014).
3. К.А. Ковалевский, Н.В. Абросимов, Р.Х. Жукавин и др. // Квант. Электрон., т. 45, 113 (2015).

# Полупроводниковые нанозлектромеханические системы: возбуждение и затухание колебаний

А.А. Шевырин<sup>1,\*</sup>, А.Г. Погосов<sup>1,2</sup>, А.К. Бакаров<sup>1,2</sup>, А.А. Шкляев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090.

\*shevandrey@isp.nsc.ru

Экспериментально обнаружено, что электростатическое емкостное возбуждение колебаний имеет особенности в случае нанозлектромеханических систем на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, связанные с пьезоэлектрическими свойствами материала, наличием областей прикраевого обеднения и чувствительностью системы к неравновесному связанному заряду. Обнаружен эффект замороженного фотоиндуцированного изменения добротности, похожий на известное явление замороженной фотопроводимости. Обнаружение этого эффекта позволяет раскрыть природу универсальной особенности систем на основе AlGaAs/GaAs – пика диссипации, наблюдаемого на ее температурной зависимости вблизи 30 К.

## Введение

Полупроводниковые гетероструктуры, такие как AlGaAs/GaAs, являются высококачественным материалом для создания не только низкоразмерных электронных систем, но и наномеханических резонаторов, а также нанозлектромеханических систем (НЭМС), обладающих как электронно-транспортной, так и механической функциональностью. Настоящая работа посвящена двум из тем, наиболее значимых для изучения НЭМС, в частности, физическим механизмам возбуждения и затухания колебаний в системах на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs.

## Методика эксперимента

Экспериментальные образцы представляют собой крестообразные наномеханические резонаторы, имеющие форму мостиков, имеющие длину 6 мкм, ширину 1,5 мкм (в узкой части) и толщину 166 нм (см. Рис. 1 (а)). Колебания резонаторов возбуждались за счет электростатического емкостного механизма путем подачи суммы постоянного и переменного напряжения между резонатором и близлежащими боковыми затворами.

Детектирование колебаний производилось путем измерения отклика сопротивления сужения двумерного электронного газа, расположенного вблизи заделанного края.

Измерения проводились при температуре жидкого гелия, образец находился в вакууме.

## Результаты и обсуждение: возбуждение колебаний

Зависимости амплитуды колебаний и резонансной частоты от постоянной составляющей затворного напряжения показаны на Рис. 1 (b). Измеренные зависимости демонстрируют как свойства, типичные для электростатического емкостного возбуждения, так и ярко выраженные особенности. В частности, зависимость амплитуды линейна (вдали от минимума), а зависимость резонансной частоты – квадратична, что отражает тот факт, что колебания возбуждаются за счет электростатического емкостного механизма. Первая из особенностей заключается в том, что минимум амплитуды и максимум резонансной частоты сдвинуты относительно нуля в сторону положительных затворных напряжений на различные величины, в то время как классическая модель предсказывает, что обе зависимости должны быть симметричны относительно оси Y. Вторая особенность заключается в том, что в своем минимуме амплитуда не обращается в нуль, а остается конечной. Обе перечисленные особенности классической моделью не объясняются.

Сдвиг кривых вдоль оси X можно объяснить влиянием заряда, встроенного в резонатор и в подложку. Поскольку после медленного охлаждения образца пространственное распределение зарядов доноров и поверхностных состояний соответствует условию поверхностного пиннинга уровня Ферми, можно показать, что их влияние не согласуется с величинами сдвига кривых вдоль оси затворных напряжений.

Однако, поскольку резонатор обладает пьезоэлектрическими свойствами, его колебания приводят к неоднородной динамической электрической поляризации, которая может эквивалентным образом быть представлена как связанный заряд в объеме и на поверхности резонатора. Численный расчет, проведенный методом конечных элементов, показывает, что гипотеза о пьезоэлектрически индуцированном заряде согласуется с экспериментальными результатами не только качественно, но и количественно. Таким образом, пьезоэлектрические свойства материала требуют обязательного учета при использовании электростатического емкостного возбуждения.

Тот факт, что амплитуда колебаний в своем минимуме не достигает нуля, демонстрирует наличие сдвинутой по фазе силы, дополнительной к той, что предсказывает классическая модель. Такая

сила может возникать вследствие того, что резонатор содержит плохо проводящие области, перезарядка которых в ответ на периодическое изменение затворного напряжения запаздывает по сравнению с хорошо проводящим объемом двумерного электронного газа. В качестве таких областей можно рассматривать прежде всего прикраевые полуобедненные области с низкой концентрацией электронов. Гипотеза о роли таких областей была проверена экспериментально. В частности, было показано, что кратковременное освещение образца, сокращающее ширины прикраевого обеднения, делает амплитуду существенно более близкой к нулю. Кроме того, было обнаружено, что после освещения кривые дополнительно сдвигаются вправо, что демонстрирует чувствительность системы к неравновесному связанному заряду, индуцируемому освещением.

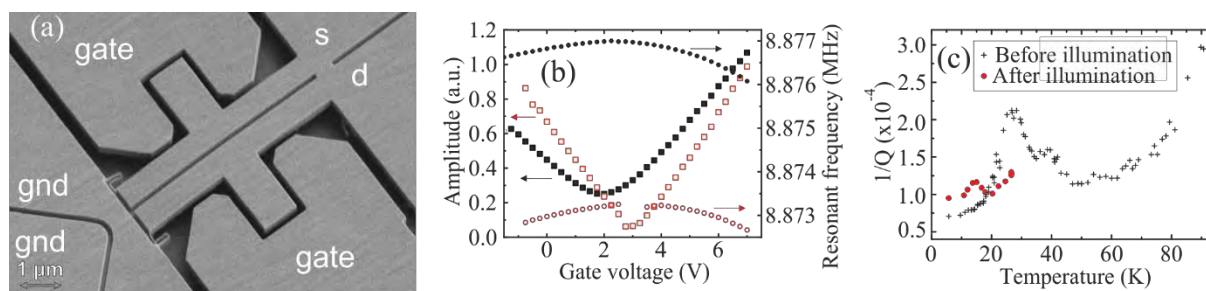


Рис. 1. (a) Экспериментально изученный наномеханический резонатор (b) Зависимости амплитуды и резонансной частоты от постоянной составляющей затворного напряжения (c) Диссипация (обратная добротность) как функция температуры

## Результаты и обсуждение: затухание колебаний

Температурная зависимость диссипации (величины, обратной добротности) показана на Рис. 1 (c). Видно, что кривая, измеренная до освещения образца, демонстрирует пик вблизи 30 К. Похожие пики наблюдались и в работах других авторов, что позволяет говорить об их универсальности. Однако, объяснения, приводимые в этих работах, противоречивы: рассматривалась и роль термоупругих потерь, и влияние точечных дефектов и примесей, и возможный вклад двухуровневых систем.

В ходе наших экспериментов было обнаружено, что кратковременное освещение образца при низких температурах меняет добротность колебаний, причем после прекращения освещения добротность остается существенно измененной. Таким образом, обнаруженный эффект похож на явление заморо-

женной фотопроводимости. При этом после освещения пик при 30 К становится существенно менее выраженным. Полученный результат демонстрирует, что природа этого пика никак не связана с взаимодействием между фононами и с термоупругими процессами. Предложено альтернативное объяснение, основанное на гипотезе о роли реориентации DX-или похожих чувствительных к свету центров. Обнаруженное «замороженное» влияние света на добротность требует обязательного учета при изучении нанозлектромеханических систем оптическими методами.

Работа поддержана грантом РФФИ №21-52-10013.

## Литература

1. A. A. Shevyrin, A. G. Pogosov *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 118, 183105 (2021).
2. A. A. Shevyrin, A. G. Pogosov *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 116, 053104 (2020).



# Зависимость параметров резистивного переключения в мемристорах Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt от условий формирования активного электрода

М.Е. Шенина\*, И.Н. Антонов, О.Н. Горшков, Д.О. Филатов, М.Н. Коряжкина

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский Государственный университет им. Н.И. Лобачевского», пр-т Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603950

\*cyrix@bk.ru

Проведено исследование зависимости параметров резистивного переключения мемристоров на основе Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt от условий магнетронного осаждения активного Ta электрода. Показано, что увеличение парциального давления кислорода при осаждении слоя Ta приводит к росту напряжения формовки и уширению диапазона рабочих напряжений исследуемых структур. Эффект связывается с увеличением сопротивления и ухудшением металлических свойств частично окисленного танталового электрода с ростом содержания кислорода в атмосфере осаждения, что приводит к дополнительному ограничению тока через мемристор.

Принцип функционирования резистивной памяти заключается в воспроизводимом переключении, по крайней мере, между двумя сопротивлениями структуры под действием внешнего электрического поля (т. н., резистивные переключения – РП), а устройства, реализующие это явление, называют мемристорами. Одним из наиболее распространенных классов материалов для функционального слоя мемристоров являются оксиды металлов (TaO<sub>x</sub>, ZrO<sub>x</sub>, HfO<sub>x</sub> и др.), а геометрическая структура устройства представляет собой, как правило, плоский конденсатор. Нестабильности параметров РП (напряжение переключения, значения силы тока через мемристор в резистивных состояниях) до сих пор накладывают существенное ограничение на их широкое практическое применение, несмотря на явные перспективы в области компьютерной памяти, нейроморфных вычислений и т. д. [1]. В настоящее время развивается ряд подходов к решению проблемы стабильности параметров РП [2,3], однако всё большее количество исследователей склоняются к комплексному подходу, сочетающему выбор материалов слоёв мемристора [4], управляющих протоколов переключения, включая маломощные режимы резистивных переключений [2,3]. В частности материаловедческий подход может заключаться в использовании в качестве одного из электродов мемристора пассивного по химическому взаимодействию с кислородом материала диэлектрика (см., например, [4]), что приводит к подавлению побочных окислительно-восстановительных реакций на

одной из границ «оксид-металл» и уменьшает разброс параметров РП. При этом свойства активного электрода мемристора становятся в большей мере определяющими стабильность и возможные рабочие диапазоны параметров структур.

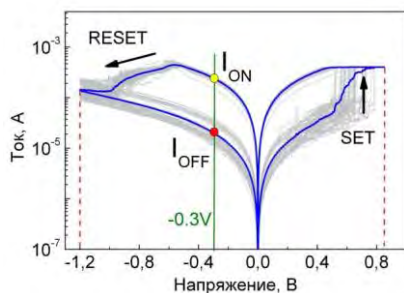
В данной работе проведено исследование зависимости параметров РП мемристоров на основе Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt от условий магнетронного осаждения активного Ta электрода.

## Методика эксперимента

Функциональный диэлектрический слой ZrO<sub>2</sub>(Y) исследуемых структур сформирован методом послойного магнетронного осаждения плёнок ZrO<sub>2</sub> (12 мол.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) при комнатной температуре на подложках из стекла с предварительно осажденными Ti адгезионным подслоем и Pt слоем, играющим роль нижнего электрода. Верхний Ta электрод формировался через теневую маску методом магнетронного осаждения в условиях различного парциального давления компонентов рабочей атмосферы Ar/O<sub>2</sub>, влияющего на степень окисления Ta электрода, который, в отличие от инертного Pt, является резервуаром кислородных вакансий в процессе РП [5]. Влияние условий магнетронного осаждения активного Ta электрода на параметры РП было выявлено с помощью измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) мемристоров, сформированных при прочих одинаковых условиях. Измерения ВАХ исследуемых структур проводились с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

## Результаты и обсуждение

В данной работе проведено исследование зависимости параметров РП мемристоров на основе Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt от условий магнетронного осаждения активного Ta электрода. Исследованные мемристоры обладают биполярным типом РП в области напряжений до ±3В и токов ~ 800 мкА (рис.1).



**Рис. 1.** ВАХ мемристоров Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt. Синим цветом показана усредненная ВАХ. Пунктирными линиями показан диапазон рабочих напряжений. Стрелками показано направление развертки напряжения

**Таблица 1.** Параметры РП структуры Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y)/Pt в зависимости от состава рабочей атмосферы в процессе магнетронного осаждения слоя Ta

Состав рабочей атмосферы	Ar-100%	Ar-97% - O <sub>2</sub> -3%	Ar-90% - O <sub>2</sub> -10%
Среднее $V_f$ (среднеквадратичное отклонение $V_f$ ), В	2.9 (0.5)	2.3 (0.2)	6.8 (1.6)
Среднее отношение токов $I_{ON}/I_{OFF}$ при -0.3 В	3.5	6.4	3.5
Максимальный ток, $\mu$ А	500 – 800	460 – 520	400 – 950
Диапазон рабочих напряжений, В	-1.6 – 1	-1.2 – 1	-2.7 – 2

Таким образом, показана возможность управления параметрами РП путём варьирования парциального давления кислорода в атмосфере в процессе осаждения активного электрода мемристора.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Н-466-99\_2021-2023).

## Литература

1. A. Thomas // Journal of Physics D: Applied Physics, V. 46, 093001 (2013).

На рис.1 показаны ВАХ мемристоров, сформированных в условиях осаждения активного Ta электрода в атмосфере Ar-97%(7 sccm) и O<sub>2</sub>-3%(0.2 sccm).

Увеличение парциального давления кислорода при осаждении слоя Ta приводит к значительным изменениям значений напряжения формовки  $V_f$  и среднего отношение токов  $I_{ON}/I_{OFF}$  и уширению диапазона рабочих напряжений исследуемых структур (см. таблицу 1).

Эффект состава рабочей атмосферы связывается с увеличением сопротивления и ухудшением металлических свойств частично окисленного тантала с ростом содержания кислорода в атмосфере, что приводит к дополнительному ограничению тока через мемристор и, как следствие к уширению интервалов напряжений  $V_f$  и резистивных переключений.

2. L. Zhu, J. Zhou, Z. Guo *et al.* // Journal of Materials, V. 1, 285 – 295 (2015).

3. C. La Torre, K. Fleck, S. Starschich *et al.* // Physica Status Solidi A, V. 213, 316 – 319 (2016).

4. N. K. Upadhyay, W. Sun, P. Lin *et al.* // Advanced Electronic Materials, V. 6, 1901411 (2020).

5. S. Wiefels, M. Von Witzleben, M. Hüttemann *et al.* // IEEE Transactions on Electron Devices, V. 68, 1024 – 1030 (2021).



# Влияние термического отжига на химический состав системы Si:Co

Н.С. Широких<sup>1,\*</sup>, Д.Е. Николичев<sup>1,2</sup>, С.Ю. Зубков<sup>1,2</sup>, Р.Н. Крюков<sup>1,2</sup>, М.В. Дорохин<sup>1,2</sup>, Ю.А. Дудин<sup>2</sup>, Ю.М. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

<sup>2</sup> НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950.

\*shirokikhnikita1@yandex.ru

Проведение постимплантационного отжига системы Si:Co приводит к появлению на поверхности системы пленки оксида кремния и сокращению количества атомов Co, находящихся в химической связи Co-Si.

## Введение

Термоэлектрические преобразователи считаются перспективным альтернативным источником энергии. Основной задачей технологии создания термоэлектриков является разработка материалов, у которых КПД преобразования достаточно высок для конкуренции с другими источниками энергии [1]. Одним из подходов к повышению КПД является модификация структуры «классических» термоэлектрических материалов, например, введение в матрицу наноразмерных включений, понижающих коэффициент теплопроводности. Одной из ключевых задач изучения таких материалов является исследование их химических свойств.

## Методика эксперимента

В работе проведено исследование элементного и химического состава образца Si:Co до и после высокотемпературного отжига в атмосфере аргона. Исследуемый образец - пластина кремния (100) марки КЭФ-3000, которая была подвергнута имплантации с дозой  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и энергией ускорителя 80 кэВ. При этом в ходе предварительных исследований было установлено, что в потоке ускоренных ионов имеются Co<sup>1+</sup>, Co<sup>2+</sup> и Co<sup>3+</sup>, что обусловило многообразие профилей распределений. На следующем этапе образцы подвергались термическому отжигу при температуре 1000°C и длительности 15 сек. Исследование проводилось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии совместно с профилированием ионами аргона в системе Omicron Multiprobe RM, способной обеспечивать вакуум до 10<sup>-10</sup> Торр в процессе записи спектра.

Энергия ионов Ar<sup>+</sup>, используемая для послойного анализа, составляла 1 кэВ при угле относительно

плоскости образца 45 градусов. Определение положения и идентификация спектральных линий производилась с помощью атласов и литературных данных для выбранных фотоэлектронных линий. Они выбирались ближе к валентной зоне, ввиду меньшей спектральной ширины таких пиков. Анализировались фотоэлектронные линии Si 2s, Co 2p<sub>3/2</sub>, O 1s и C 1s. Количественный анализ проводился с помощью метода факторов относительной чувствительности с методическим уточнением их значений [2].

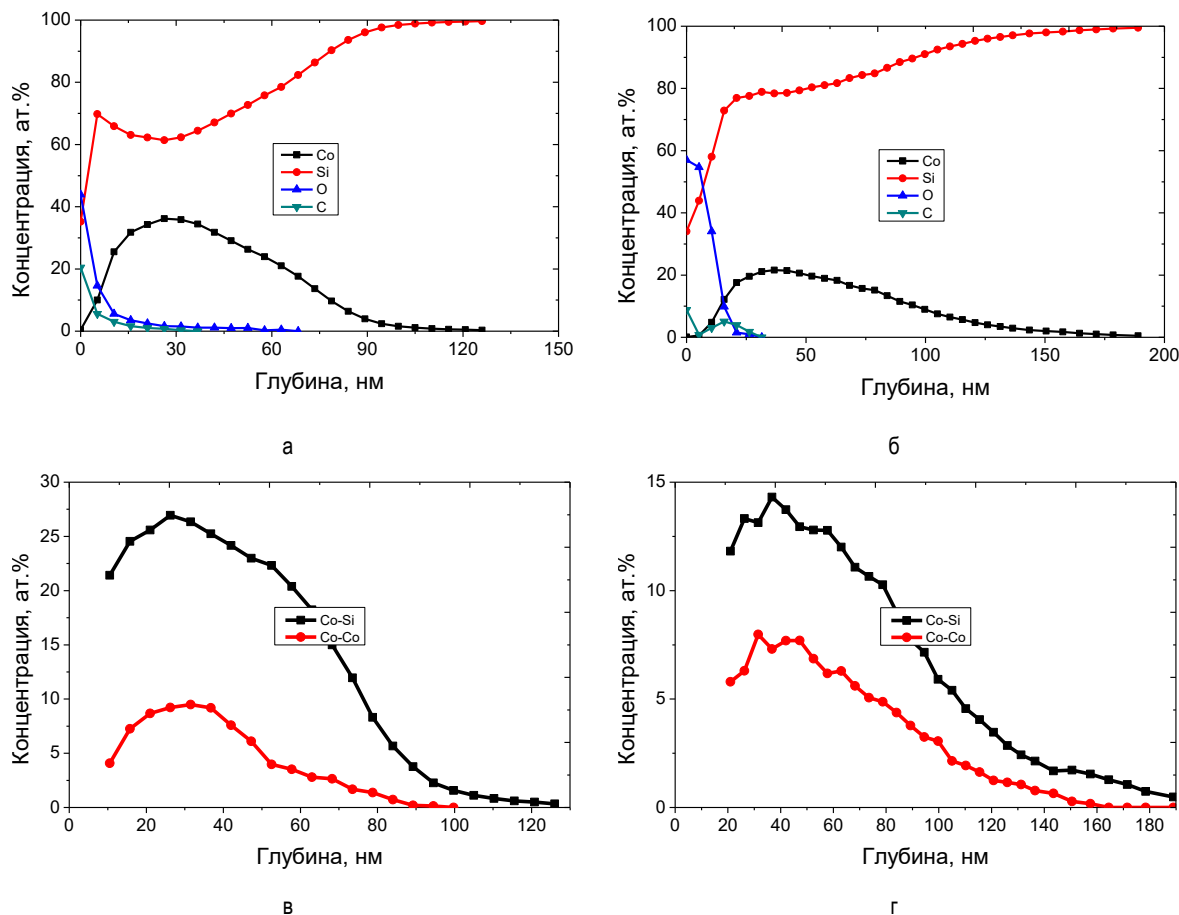
## Результаты

Профили распределения содержания элементов и концентрации химических состояний показывают, что в результате ионной имплантации кобальт внедряется в кремний на глубину около 30 нм в максимуме распределения (рисунок 1 а). Отжиг структуры в течение 15 с провоцирует термически стимулированную диффузию атомов металла вглубь Si подложки. Это приводит к проникновению Co до глубины 180 нм и размытию профиля. В дополнение к этому происходит формирование поверхностного слоя, обогащенного кислородом. Предположительно этот факт связан с вытеснением на поверхность атомов Si, которые впоследствии образуют химическую связь с кислородом. Косвенным подтверждением этого является наличие захороненного слоя углерода под этим слоем (рисунок 1 б).

В ходе спектрального анализа фотоэлектронных линий в рамках методики [2] было установлено, что внедренный в кремневую подложку Co образует 2 типа химических связей Co-Co и Si-Co, детектируемые на протяжении всей проанализированной толщины (рисунок 1 в). Последующий отжиг приводит к количественному перераспределению химических связей, что выражается в увеличении количества

связей Co-Co за счет сокращения связей Co-Si (рисунк 1 г) Такое поведение системы предположительно связано с значительной аморфизацией подложки Si при проведении имплантации и, как след-

ствие хаотичным формированием химических связей. Постимплантационный отжиг приводит к упорядочению химических связей. Такое поведение приводит к сокращению концентрации эффективно встроившихся атомов Co.



**Рис. 1.** Профили распределения химических элементов по глубине в системе Si:Co  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  а) до и б) после отжига в течение 15 с. при  $1000^\circ\text{C}$  и профили распределения химических связей в) до и г) после отжига

Таким образом, постимплантационный отжиг системы Si:Co при температурах  $1000^\circ\text{C}$  приводит к формированию на поверхности структур слоя  $\text{SiO}_2$  и сокращению количества эффективно встроившихся атомов Co.

Измерения коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) сформированной системы, выполненные методом частотного разделения, показали снижение  $\lambda$  в результате имплантации и отжига. Предположительно, это связано с формированием в системе наноразмерных включений  $\text{CoSi}_2$ . Наличие таких

включений косвенно подтверждается регистрацией атомов Co, связанных с кремнием (Co-Si).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ «Аспиранты» (20-32-90032).

## Литература

1. П. Шостаковский // Новые технологии. Компоненты и технологии, №12. С. 131 (2010).
2. A.V. Boryakov, S.I. Surodin, R.N. Kryukov and *et al.* // J. of Elect.Spectr. and Related Phen, V. 50, 1443 (2018).

# Ток утечки через подзатворный диэлектрик в транзисторах с длиной канала до 100 нм

Т.А. Шоболова<sup>1,&</sup>, В.В. Гасенин<sup>2,\$</sup>, Е.Л. Шоболов<sup>1,#</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е.Седакова», ул. Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603137.

<sup>2</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», проспект Мира, 37, г.Саров, 607188.

& shobolova.ta@mail.ru, # shelv@inbox.ru, \*obolensk@rf.unn.ru, \$ gasenin@yandex.ru

В работе опытным путем получена зависимость тока утечки через подзатворный диэлектрик от температуры в металл-оксид-полупроводник транзисторе, изготовленном на структуре «кремний на изоляторе» с проектными нормами 100 нм. Посредством численного моделирования рассчитана длина волны электрона вблизи подзатворного диэлектрика транзистора при максимальной ортогональной составляющей дрейфовой скорости. Определены вклады таких механизмов переноса носителей заряда в ток утечки через подзатворный диэлектрик как: термоэлектронная эмиссия, полевое туннелирование и эмиссия Пула – Френкеля

## Введение

В данной работе исследован ток утечки через подзатворный диэлектрик в МОП – транзисторах с проектными нормами 100 нм. Оценен вклад в этот ток разных механизмов переноса носителей заряда: эмиссия Шоттки, эмиссия Пула-Френкеля, полевое туннелирование. Исследована зависимость тока утечки через подзатворный диэлектрик от температуры и дозы гамма- облучения.

## Объект и методы исследования.

В ходе работы исследовались характеристики МОП- транзистора с проектными нормами 100 нм.

В таблице 1 приведены полученные значения тока утечки через подзатворный диэлектрик.

**Таблица 1.** Значения тока утечки через подзатворный диэлектрик в зависимости от длины канала и температуры. W – ширина и L – длина канала транзистора.

Тип транзистора	Ток утечки через подзатворный диэлектрик, нА			
	п-канальный транзистор		Р-канальный транзистор	
W/L	10/10	10/0,1	10/10	10/0,1
Значение температуры, С				
+125	80,3	85,2	15,7	20,99
+85	70	74	15	20
-20	50	61	13	10,9
-60	47	51	8,5	10,23

Ток утечки п-канальных транзисторов в 4-5 раз превосходит тока р-канальных транзисторов, вследствие отличия толщины подзатворного диэлектрика [1], также вследствие разницы длин волн и масс электронов и дырок.

## Численное моделирование

Исследование распределения тока утечек было выполнено посредством численного моделирования 2D структуры, калиброванной по геометрическим, структурным и электрофизическим характеристикам.

Численное моделирование заключается в решении фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов [1].

Автором [2] показано, что в МОП-транзисторах с толщиной подзатворного диэлектрика менее 3 нм при напряженности электрического поля 8 МВ/см, ток Фаулера- Нордгейма составляет  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>. Поэтому далее этот ток не учитывали.

Для численного расчета эмиссии Пула – Френкеля на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> были размещены дефекты, концентрацией 10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup> и учтено гамма – воздействие.

## Результаты моделирования и обсуждение

Для определения наличия туннельной составляющей в ток утечки через диэлектрик, были получены распределение поля, плотности тока и дрейфовой скорости в подзатворном диэлектрике и канале транзистора, перпендикулярные границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> при U<sub>s</sub>=0 В, U<sub>g</sub>=0,55В, U<sub>d</sub>=1,2 В.

Максимальная напряженность электрического поля вдоль оси O<sub>y</sub> наблюдается в подзатворном диэлектрике и достигает 1,59·10<sup>6</sup> В/см, чего достаточно для туннелирования сквозь узкие потенциальные барьеры на границе с диэлектриком [3].

Для определения области утечки тока из канала в поликремниевый затвор, посредством численного моделирования, рассчитали распределение плотности тока в 2D сечении исследуемого транзистора, направленного вдоль оси Оу.

Получили, что ток утечки через подзатворный диэлектрик (в затворе) течет неравномерно с явным максимумом в центре затвора. Плотность тока в затворе вблизи с границей с подзатворным диэлектриком, составляет  $0,4 \text{ А/см}^2$ .

Так как вся кинетическая энергия электрона перешла в энергию туннелирования, то при скорости электрона  $2 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ , движущегося вдоль оси Оу, длина волны составляет 36 нм, что превосходит толщину подзатворного диэлектрика. Поэтому часть электронов из области канала попадают в затвор посредством прямого туннелирования через подзатворный диэлектрик [4].

Для определения вклада эмиссии Пула-Френкеля провели исследования характеристик транзисторов при гамма – облучении.

### Гамма-воздействие

Описанные выше факторы привели к ограничению (выходу на насыщение) туннельного тока через подзатворный диэлектрик.

В таблице 2 приведены теоретические [5], экспериментальные и расчетные данные тока утечек, определенные разными механизмами в МОП транзисторах.

**Таблица 2.** Значения плотности тока утечки в зависимости от механизма переноса носителей заряда и типа определения

Механизм эмиссии	Теоретические данные, А/см <sup>2</sup>	Экспериментальные данные, А/см <sup>2</sup>	Расчетные данные, А/см <sup>2</sup>
Термоэлектронная	–	1	0,001
Туннельная	3	4,12	0,4
Пула-Френкеля	$<10^{-6}$	0,01	0,00003

Таким образом, полученные посредством численного моделирования значения далеки от значений,

полученных экспериментально, вследствие отсутствия учета всех видов зарядов и явлений, характерных МОП-транзисторам.

### Заключение

В данной работе исследовались механизмы тока утечки через подзатворный диэлектрик в МОП-транзисторах с толщиной диэлектрика 17А.

Посредством исследования экспериментально полученных и рассчитанных характеристик структур оценен вклад в ток утечки следующих механизмов переноса носителей заряда через подзатворный диэлектрик: эмиссии Шоттки, Пула-Френкеля и полевого туннелирования.

В ходе работы показано, что численное моделирование тока утечки через подзатворный диэлектрик не дает достаточно точных результатов (ошибка менее 10%), так как не учитывает в полном объеме все присутствующие в структуре явления и эффекты. Таким образом, для определения тока утечки через подзатворный диэлектрик необходимо проведение эксперимента.

### Литература

1. Шоболова Т.А., Кузнецов С.Н., Гасенин В.В., Шоболов Е.Л., Оболенский С.В. Исследование методов определения порогового напряжения металл-оксид-полупроводник транзисторов разной геометрии // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 4 (263). 2021.
2. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. 288 с.
3. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов: монография. Вильнюс: Мокслас, 1989.
4. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов, часть 1. М.: Техносфера, 2002. 416 с.
5. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В., Пирс К., Адамс А. и др. // Технология СБИС. М.: Мир, 1986. 404 с.

# Электрические свойства AlGaAs нитевидных нанокристаллов типа "ядро-оболочка"

И.В. Штром<sup>1,3</sup>, Р.Р. Резник<sup>1,2</sup>, В.О. Гридчин<sup>2,3</sup>, Б.Р. Бородин<sup>4</sup>, К.П. Котляр<sup>2,3</sup>,  
П. Алексеев<sup>4</sup>, Г.Е. Цырлин<sup>1,2,3</sup>

1 Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная 13Б, Санкт-Петербург, 199034, Россия.

2 Академический университет РАН, ул. Хлопина 8, кор.3, 194021, Санкт-Петербург, Россия.

3 Институт аналитического приборостроения РАН, ул. Ивана Черных 31-33, Санкт-Петербург, 190103, Россия.

4 ФТИ им А.Ф. Иоффе, Политехническая улица 26, 194021, Санкт-Петербург, Россия.

igorstroh@mail.ru

В данной работе представлены экспериментальные исследования по легированию кремнием и бериллием AlGaAs нитевидных нанокристаллов, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Исследованы электрические свойства AlGaAs ННК легированных Si и Be.

## Введение

AlGaAs нитевидные нанокристаллы (ННК) выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на Si подложке зарекомендовали себя как перспективный материал для применения в наноптонике. Ранее нами было продемонстрирована возможность создания ансамблей источников одиночных фотонов с оптической накачкой на основе гибридных наноструктур AlGaAs ННК со встроенной квантовой точкой GaAs [1]. Однако для эффективного применения подобных структур в современной криптографии и приборостроении, важно, иметь возможность электрической накачки источников одиночных фотонов. Для этого, необходимо, исследовать легирование AlGaAs ННК р- и n- типами. Данная работа посвящена синтезу и исследованию электрических, оптических свойств AlGaAs легированных Si и Be. Описание синтеза, морфологических свойств и кристаллическая структура массивов AlGaAs продемонстрировано в нашей работе [2]. Важно отметить, что AlGaAs ННК имеют спонтанно образованную структуру "ядро-оболочка" в вюрцитной фазе [3]. Легирование осуществлялось с помощью включения источника Si или Be в ростовой камере молекулярно-пучковой эпитаксии. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) AlGaAs ННК, выращенных на подложке кремния, производилось с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Ntegra Aura (NT-MDT) при комнатных условиях. Так же были сняты токовые карты вертикально стоящих ННК. Получена информация о проводимости ядра и оболочки AlGaAs ННК. В целом, картина токовых карт явно указывает на то, что ядро и оболочка имеют разные типы легирования.

## Результаты и обсуждение

На Рис.1 показано изображение легированных AlGaAs ННК, полученное методом сканирующей электронной микроскопии. Измерения спектров фотолуминесценции показали те же результаты, что и в случае не легированных ННК [2,3].

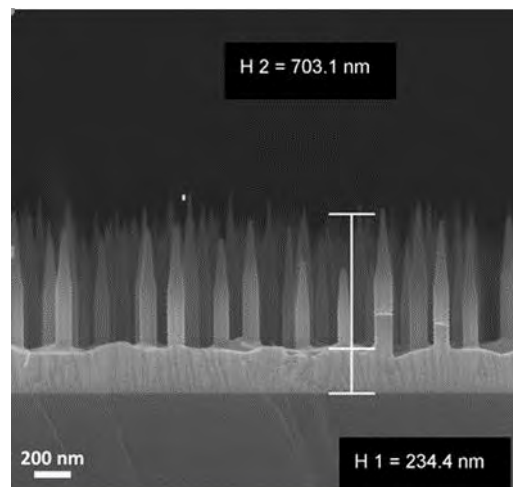
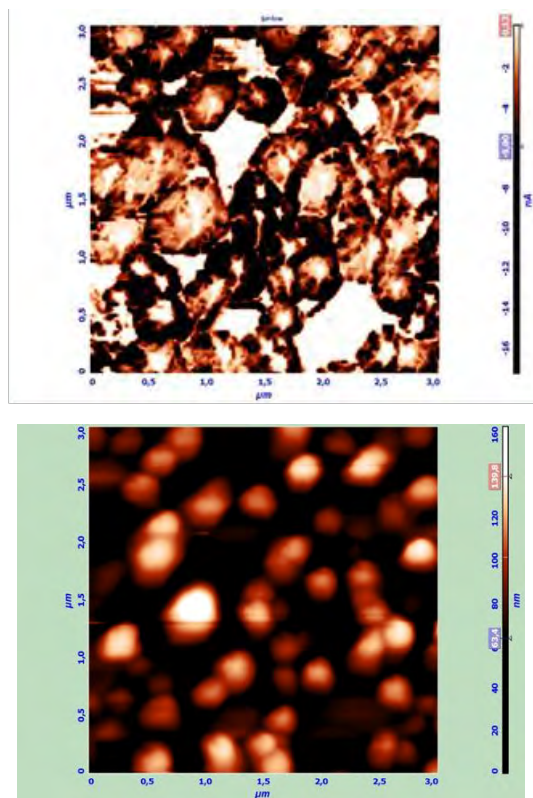


Рис. 1. СЭМ изображение ННК AlGaAs

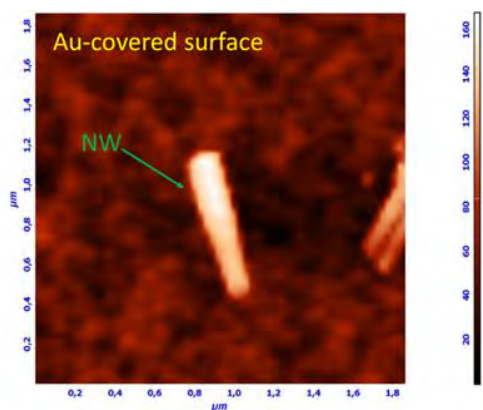
Исследование электрических свойств проводилось с помощью атомно-силового микроскопа (СЗМ) Ntegra Aura (NT-MDT). СЗМ-зонд перемещался в направлениях  $x$  (сканирование плоскости) или в вертикальном направлении  $z$ , чтобы воздействовать на ННК. [4]. ВАХ одиночного ННК AlGaAs на подложке Si были измерены с помощью кондуктивной атомно-силовой микроскопии (С-AFM) путем контакта зонда с одним ННК. Кривые ВАХ от разных ННК схожи и имеют стандартную форму для р-n перехода. Была получена информация о проводимости ядра и оболочки ННК AlGaAs (рис.2). В целом,



карты сканирования (рис. 2) показывают, что ядро и оболочка имеют разные типы легирования.



**Рис. 2.** Измерения сканирующим зондом атомно-силового микроскопа: Топология (сверху), токовая карта сканирования (снизу)/ I (nA)

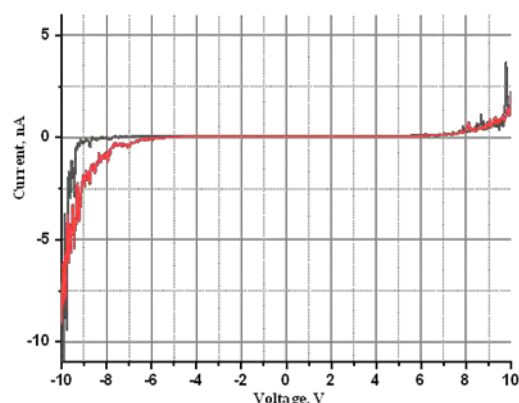


**Рис. 3.** Одиночный AlGaAs ННК перенесенный на позолоченную подложку

Чтобы измерить проводимость оболочки, ННК были перенесены на позолоченную подложку (Рис.3). В

этом эксперименте контакт с ННК осуществлялся через оболочку. Кривые ВАХ (Рис.4) аналогичны кривым в случае одного вертикально стоящего ННК. Из этого можно сделать вывод, что проводит оболочка ННК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта СПбГУ № 75746688, электрические свойства исследованы при поддержке гранта РФФ №19-72-30004



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики ННК измеренных на золоте

## Литература

1. L. Leandro, R. Reznik, J. D. Clement, J. Repán, M. Reynolds, E. V. Ubyivovk, I. V. Shtrom, G. Cirlin & N. Akopian, Wurtzite AlGaAs nanowires Scientific Reports (2020), 10(1).
2. Lorenzo Leandro, Christine P. Gunnarsson, Rodion Reznik, Klaus D. Jöns, Igor Shtrom, Artem Khrebtov, Takeshi Kasama, Valery Zwiller, George Cirlin, Nika Akopian. Nano Lett.(2018), v.18, N 11, pp.7217 – 7221.
3. G.E. Cirlin, R.R. Reznik, I.V. Shtrom, A.I. Khrebtov, I.P. Soshnikov, S.A. Kukushkin, L. Leandro, T. Kasama, Nika Akopian. J. Phys. D: Appl. Phys. 2017, v.50, 484003.
4. Alekseev P A, Sharov V A, Borodin B R, Dunaevskiy M S, Reznik R R and Cirlin G E (2020) Micromachines 11 581.



# Теория двумерного вигнеровского кластера

М.В. Энтин<sup>1,\*</sup>, Мехрдад М. Махмудиан<sup>1,2,§</sup>, М.М. Махмудиан<sup>1,2,&</sup>

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

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

\*entin@isp.nsc.ru, §m.makhmudian1@g.nsu.ru, &mahmood@isp.nsc.ru

Были промоделированы вигнеровские кристаллы с разным количеством электронов  $n$  с разным внешним потенциалом. Один из таких потенциалов – потенциал с гексагональной асимметрией. Получены структуры для электронов, зажатых между жёсткими стенками. Изучены термодинамические свойства кластеров.

Вигнеровский кристалл был предложен в [1] в качестве модели трехмерного вещества с сильным межэлектронным отталкиванием. В работах [2-4] рассматривался двумерный случай, в котором положительные и отрицательные заряды пространственно разнесены. Ранее нами изучалась структура двумерных вигнеровских кластеров (ДВК), продольное движение электронов в которых ограничивалось различными внешними полями. Структура ДВК определяется конкуренцией кристаллизации его внутренней части и внешней формой, определяемой внешним полем. Целью настоящей работы является изучение влияния дальнего действия кулоновского отталкивания и, в частности, экранирования электронов на структуру ДВК.

Рассмотрен случай параболической ямы  $U(x, y) = x^2 + \beta y^2$  и кулоновского отталкивания в отсутствие и при наличии полевого электрода при нулевой температуре.

Было проведено моделирование структуры ДВК с разным числом электронов и параметром асимметрии потенциала ямы.

На рис.1 приведены структуры вигнеровских кластеров в отсутствие полевого электрода при нулевой температуре в зависимости от параметра  $\beta$ .

Показано, что а) решетка ДВК имеет гексагональную локальную симметрию; б) в ней присутствуют топологические дефекты с пятиугольной симметрией, плотность которых растет при приближении к границе; в) переход от дальнего действия к короткодействию не сказывается существенно на возникновении топологических дефектов и поликристалличности внутренности кластера. Нарушение периодичности решетки внутри кластера обусловлено конкуренцией изотропного поверхностного давления от ямы и требования минимальности энергии межэлектронного взаимодействия, приводящего к кристаллической внутренней структуре.

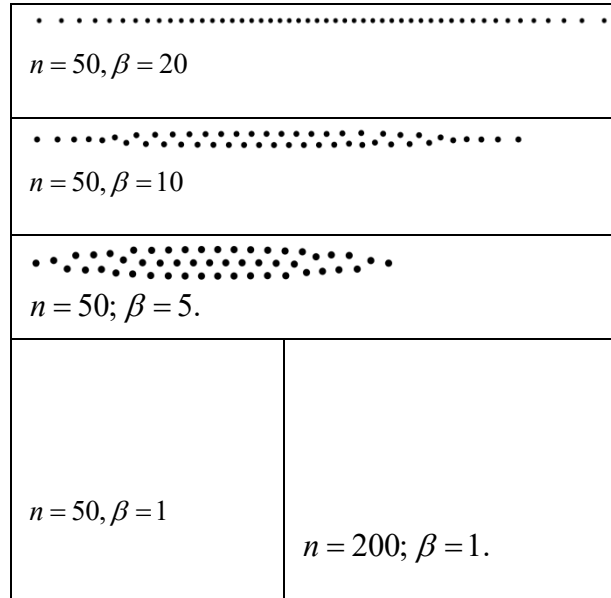


Рис. 1. Структура ДВК с разным числом электронов и значениях параметра  $\beta$ . При  $\beta=1$  кластер занимает, в среднем, круговую область. Если  $\beta > 1$  кластер вытягивается в направлении оси  $x$ . При  $\beta \ll 1$  кластер превращается в линию

На рис. 2 приведена структура ДВК из 100 электронов при наличии затравочной гексагональной асимметрии ямы  $U(x, y) = \gamma |x(x^2 - 3y^2)|$  при  $\gamma \ll 0.01$ . Из рисунка видно, что асимметрия ямы приводит к возникновению гексагональной огранки ДВК.

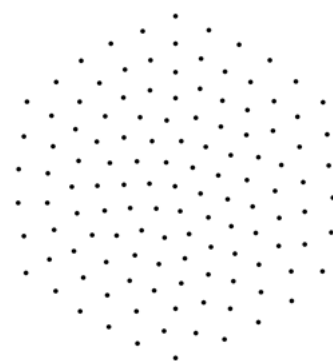
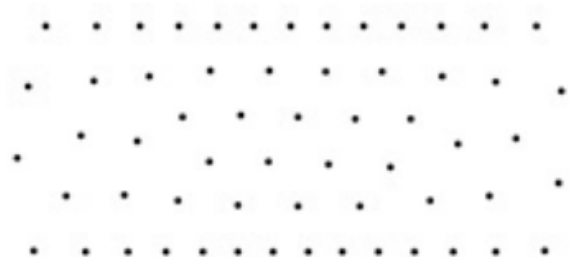


Рис. 2. Ограниченный ДВК из 100 электронов при  $\beta=1$

На рис. 3 показана структура кластера с потенциалом ямы  $U(x, y) = x^2 + y^2$ , помещенного внутри полосы. Видно, что крайние электроны прижимаются к границам полосы из-за кулоновского отталкивания и расположены по прямым линиям. Внутренние же электроны образуют вытянутый кластер с гексагональной симметрией.



**Рис. 3.** ДВК из 60 электронов внутри полосы. Крайние частицы прижимаются к границам полосы. Внутри образовался кластер с гексагональной локальной симметрией

Рассмотрено вращение ДВК при  $\beta = 1$  за счет приложения адиабатически-переменного магнитного поля соосного ДВК соленоида. Предполагалось, что магнитное поле изменяется от нуля до некоторого стационарного значения. Изменение магнит-

ного поля создает вихревое электрическое поле. Показано, что при достаточно слабом электрическом поле кластер начинает вращаться как твердое тело. Мы обнаружили, что без трения кластер приобретает угловую скорость в два раза меньше циклотронной частоты. Этот результат является универсальным, не зависящим от структуры кластера.

Численно и аналитически найдены режимы колебаний различных ДВК. Эти данные были использованы для определения низкотемпературной теплоемкости.

Работа поддержана грантом РФФИ №20-02-00622.

## Литература

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

# Особенности магнитотранспорта двойной квантовой ямы HgTe/CdHgTe в параллельном магнитном поле

М.В. Якунин<sup>1,\*</sup>, В.Я. Алешкин<sup>2</sup>, С.М. Подгорных<sup>1</sup>, В.Н. Неверов<sup>1</sup>, М.Р. Попов<sup>1</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>3</sup>, С.А. Дворецкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620219.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>3</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

\*yakunin@mail.ru

В двойной квантовой яме (ДКЯ), состоящей из двух слоев HgTe толщиной 8.5 нм, разделенных барьером 3 нм, обнаружена высокая чувствительность структуры магнитотранспорта к внешним воздействиям (параллельное магнитное поле, перпендикулярное электрическое поле и др.). Мы объясняем это имеющим здесь место тонким балансом между положениями центрального максимума легких дырок и боковых максимумов, при том что их взаимное положение легко меняет знак, а также наличием в ДКЯ своеобразного дипольного момента, отличающего ее от одиночной квантовой ямы.

## Введение

Двойная квантовая яма (ДКЯ) в гетеросистеме HgTe/CdHgTe – это простейший вариант многослойной структуры, используемой для изготовления ИК-фотодетекторов. Поэтому может быть проще исследовать различные свойства многослойных систем на ДКЯ. Для фундаментальной физики ДКЯ в этой системе интересны тем, что они могут быть использованы для создания различных неординарных вариантов энергетического спектра из-за резкой зависимости взаимного положения уровней размерного квантования разного типа от ширины ямы в сочетании с эффектами туннелирования сквозь барьер. Так, при критической толщине слоев HgTe  $d_w = 6.5$  нм (когда в одиночной яме такой ширины реализуется дираковский конусообразный спектр) в ДКЯ формируется энергетический спектр, подобный спектру двуслойного графена, но со своими особенностями [1]. Необычность зонной структуры здесь привела к обнаружению необычной возвратной структуры квантового эффекта Холла (КЭХ) [1,2]. Было показано, что природа найденных особенностей обусловлена сочетанием следующих факторов: наличие бокового максимума в валентной зоне с присущей ему высокой плотностью состояний дырок, который стабилизирует положение уровня Ферми; наложение этого максимума на спектр подзоны легких дырок и существование в КЯ HgTe аномальных уровней Ландау.

В настоящей работе описаны результаты магнитотранспортных исследований ДКЯ в той же системе,

но со слоями HgTe несколько большей толщины,  $d_w = 8.5$  нм, отвечающей точке пересечения наименьшего уровня в серии состояний с преимущественно сферическими волновыми функциями,  $E1$ , со вторым уровнем в серии тяжелых дырок,  $HH2$ . Для данной величины  $d_w$  спектр и одиночной ямы и ДКЯ имеет инверсный характер, где зоной проводимости является подзона  $HH1$ , а валентной – гибридные подзоны  $E1$  и  $HH2$  (рис. 1). Расчеты спектра выполнены 8-зонным  $kp$  методом.

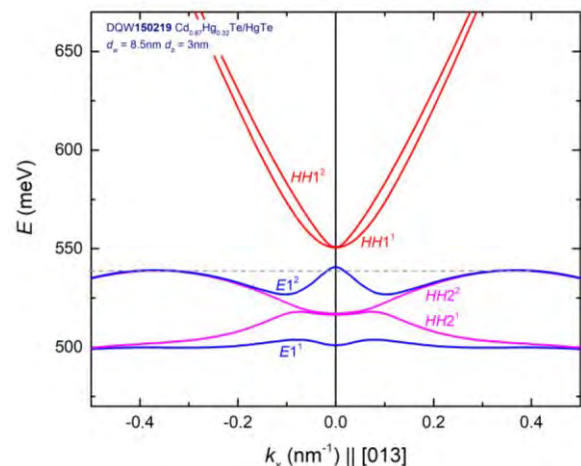


Рис. 1. Энергетический спектр исследуемой ДКЯ

## Эксперимент и интерпретация

В исследуемых ДКЯ при дырочном типе проводимости уровень Ферми жестко привязан к боковым максимумам валентной зоны, поэтому эффекты, связанные с квантованием в уровни Ландау в перпендикулярном поле [1,2], здесь выражены слабо. Но было

найдено другое специфическое явление. В интервале малых полей наблюдается очень резкая зависимость холловского магнитосопротивления (МС) от магнитного поля,  $\rho_{yx}(B)$ , с выходом на величину, близкую к первому плато КЭХ (рис. 2), что указывает на присутствие малой доли высокоподвижных носителей тока.

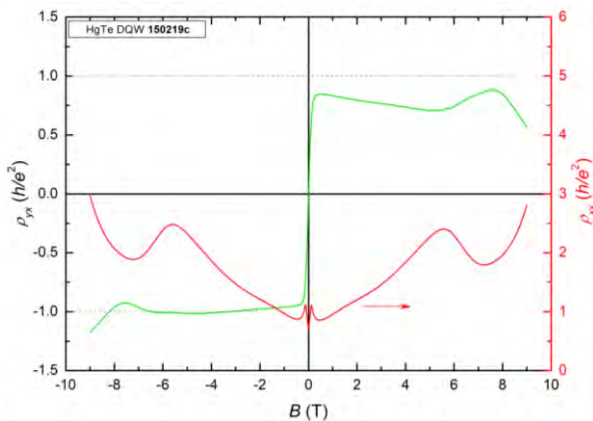


Рис. 2. Холловское и продольное МС

Расчеты зонного спектра подтверждают этот факт: действительно, центральный максимум валентной зоны здесь находится примерно на том же уровне, что и боковые максимумы (рис. 1). Необычность экспериментальных результатов также состоит в том, что найденный характер МС высокочувствителен к параметрам и воздействиям. В частности, было обнаружено, что картина МС существенно меняется от образца к образцу, хотя они вырезаны из одной пластины, и технологические данные показывают, что она однородна. Это означает, что баланс положений центрального и бокового максимумов меняется при малейшем изменении параметров слоев, либо других параметров, например, поверхностного заряда. Также было найдено, что добавление параллельной слоям компоненты магнитного поля  $B_{||}$  меняет знак наклона  $\rho_{yx}(B)$  в слабых полях с положительного на отрицательный (рис. 3). Следовательно, легкие дырки вблизи  $k=0$  заменяются на электроны. Расчеты показывают, что центральный максимум с ростом  $B_{||}$  опускается ниже боковых максимумов (рис. 4), а значит и ниже уровня Ферми, и к ним приближается край зоны проводимости. Аналогичная тенденция имеет место при приложении перпендикулярного электрического поля.

## Литература

1. М.В. Якунин, С.С. Криштопенко, С.М. Подгорных и др. // Письма в ЖЭТФ, V. 104, 415 (2016).

Такой же баланс между максимумом подзоны легких дырок и боковыми максимумами имеет место в одиночной яме шириной  $\sim 7$  нм, но в отличие от ДКЯ, отмеченных смещений подзон ни с параллельным магнитным полем, ни с перпендикулярным электрическим в одиночных ямах не происходит.

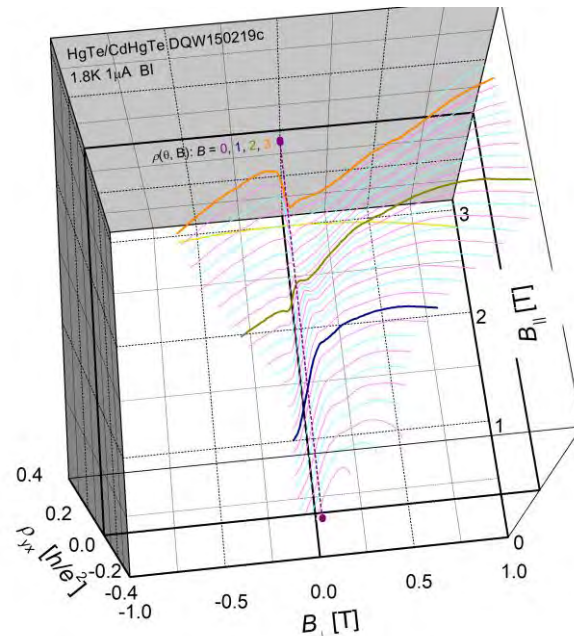


Рис. 3. Изменение наклона холловского МС возле нуля с добавлением компоненты поля  $B_{||}$ , параллельной слоям

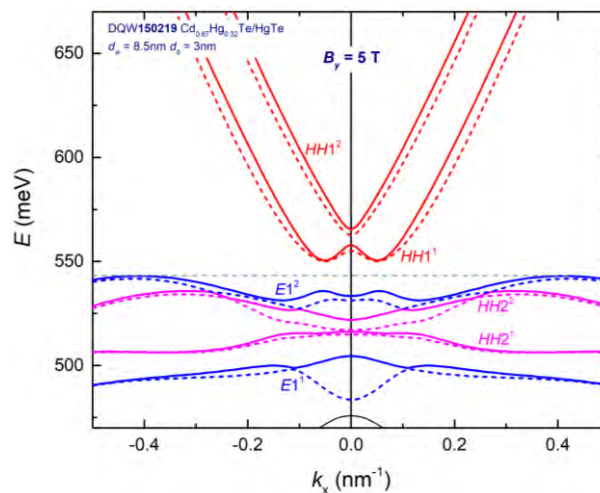


Рис. 4. Спектр ДКЯ в параллельном поле 5 Тл. Сплошные и пунктирные – подзоны с разной ориентацией спина.

Поддержана Министерством науки и образования, грант № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

2. M.V. Yakunin, S.S. Krishtopenko, S.M. Podgornykh *et al.* // Physical Review B, V. 102, 165305 (2020).

# Эпитаксиальная спин-вентильная гетероструктура $\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$ : синтез и исследование структурных, магнитных и магниторезистивных свойств

И. В. Янилкин<sup>1</sup>, А. И. Гумаров<sup>1,2</sup>, А. Г. Киямов<sup>1</sup>, А. А. Родионов<sup>1</sup>, Р. В. Юсупов<sup>1</sup>,  
Л. Р. Тагиров<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia

<sup>2</sup> Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan 420029, Russia

\* [ltagirov@mail.ru](mailto:ltagirov@mail.ru)

Гетероэпитаксиальная структура  $\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  была выращена на (001)-ориентированной монокристаллической подложке MgO с использованием комбинации методов реактивного магнетронного распыления и молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях сверхвысокого вакуума. Пилотные образцы пленки VN, бислоев  $\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{VN}$  и  $\text{VN}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  были выращены в одном цикле с целевым образцом. Исследования *in-situ* с помощью дифракции низкоэнергетических электронов и *ex-situ* с помощью дифракции рентгеновских лучей подтвердили, что все слои  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  и VN в серии выросли эпитаксиально в режиме куба-на-кубе. Измерена температурная зависимость сопротивления, которая показала резкие сверхпроводящие (СП) переходы с шириной от 21 мК до 40 мК. Исследования магнитосопротивления трехслойного образца  $\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  выявили инверсный эффект спинового клапана при переключении между параллельной и антипараллельной магнитными конфигурациями. Умеренное подавление критических температур, малая ширина СП переходов и проявление сверхпроводящих свойств спинового клапана делают эпитаксиальные нитридные сверхпроводники перспективными для приложений в сверхпроводящей спинтронике.

## Введение

Тонкая слоистая гетероструктура ферромагнетик/сверхпроводник/ферромагнетик (ФСФ) является одной из возможных компонент логических элементов в сверхпроводящей спинтронике [1]. Мы синтезировали и исследовали полностью эпитаксиальную гетероструктуру FSF, которая состоит из двух слоев сплава  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  в качестве ферромагнетика и слоя нитрида ванадия VN в качестве сверхпроводника.

## Эксперимент

Гетероструктура  $\text{MgO}/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/(20 \text{ нм}) / \text{VN}(30 \text{ нм}) / \text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}(12 \text{ нм})$  была нанесена методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МБЕ фирмы SPECS, Германия) и реактивным магнетронным распылением (BESTEC, Германия) на (001)-ориентированную эпитаксиальную монокристаллическую подложку MgO [2-5] (Рис 1a,b и d). Режим эпитаксиального роста слоев был подтвержден методами дифракции низкоэнергетических электронов (ДНЭ) (Рис. 1c) и дифракции рентгеновских лучей (РСА). Первый метод показал, что каждый

слой является монокристаллическим в латеральной плоскости на малом масштабе. Второй метод при съемке в тета и фи геометрии продемонстрировал монокристаллическую структуру каждого слоя и когерентность решеток всех 3-х слоев с монокристаллической подложкой MgO. С помощью магнитометрии VSM (QD PPMS-9) была измерена и затем смоделирована зависимость удельного магнитного момента от температуры  $M(T)$ , а также измерены петли магнитного гистерезиса в различных режимах (см. Рис. 2, верхнее окно) [5]. Методикой ферромагнитного резонанса (ФМР) (спектрометр Bruker ESP300 X-диапазона) была исследована магнитная анизотропия, которая показала кубическую симметрию с тетрагональным искажением [3]. Малая ширина резонансных линий и явная двухосная анизотропия образца миллиметрового латерального размера дополнительно свидетельствуют о монокристаллическости и эпитаксиальности полученных гетероструктур.

Различная концентрация железа в ферромагнитных слоях приводит к разным коэрцитивным полям [3], что позволяет использовать их как «свободные» и «фиксированные» слои (псевдоспиновый клапан).



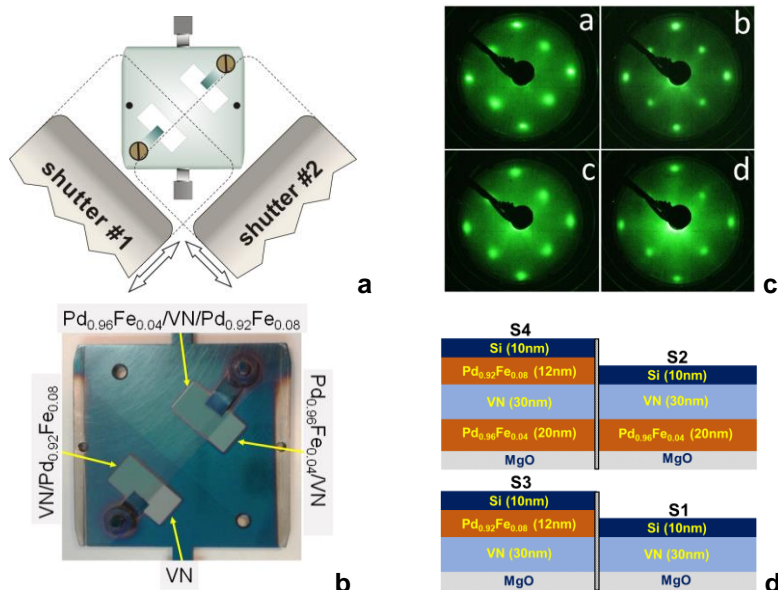


Рисунок 1. Синтез и кристалличность образцов.

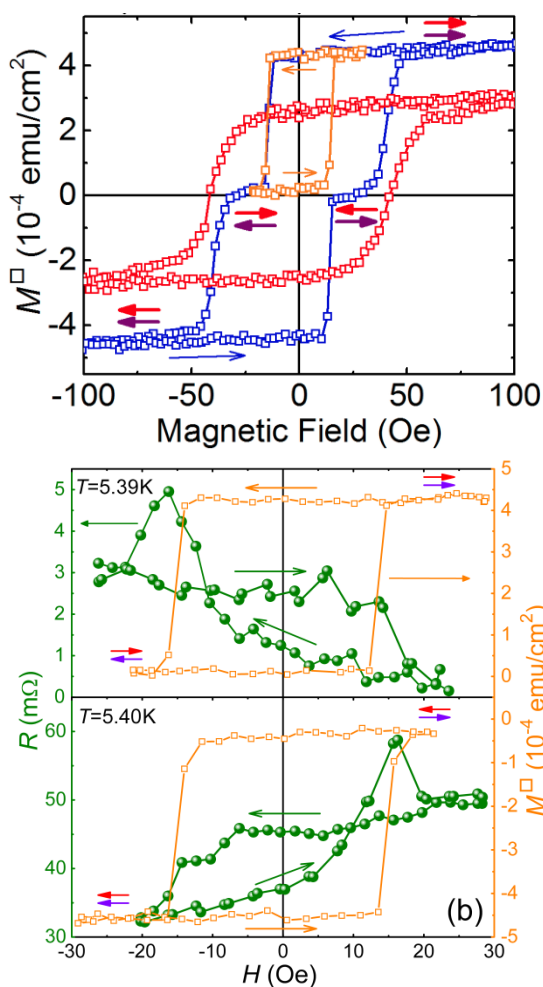


Рисунок 2. Магнитный гистерезис (верхнее окно) и магнитосопротивление при циклировании поля по малой петле (нижнее окно).

На малой петле гистерезиса получены параллельная (P) и антипараллельная (AP) взаимные ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. Магниторезистивные измерения показали обратный (инверсный) эффект сверхпроводящий спинового клапана ( $T_c(P) > T_c(AP)$ ), см. Рис 2, нижнее окно.

### Выводы

Использование монокристаллической подложки, нитридного сверхпроводника VN и ферромагнитного сплава Pd<sub>x</sub>Fe<sub>x</sub>, удовлетворяющих условиям эпитаксии, позволило вырастить полностью эпитаксиальную трехслойную гетероструктуру сверхпроводник-ферромагнетик. Ясно, что найденные условия синтеза позволяют увеличить число эпитаксиальных слоев.

### Литература

- Linder J., Robinson J. W. A. // Nat. Phys. **11**, 307 (2015).
- Esmaeili A., Yanilkin I. V., Gumarov A. I. et al. // Thin Solid Films **669**, 338 (2019).
- Esmaeili A., Yanilkin I.V., Gumarov A.I. et al. // Sci. China Materials (Springer) **64**, 1246 (2021).
- Mohammed W. M., Yanilkin I. V., Gumarov A. I. et al. // Beilstein J. Nanotechnol. **11**, 807 (2020).
- I.V. Yanilkin, W.M. Mohammed, A.I. Gumarov et al. // Nanomaterials (MDPI) **11**, 64 (2021)



## Содержание 2 тома

### Секция 3

#### Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования

<i>Cunha D., Bernardo C.R., Rodrigues M., Cerqueira F., Burdov V.A., Belsley M., Schellenberg P., Vasilevskiy M.I.</i> Quantum dot PL emission control through a nearby graphene layer .....	651
<i>Grinvald I.I., Kapustin R.V., Vorotyntsev A.V., Petukhov A.N., Pryakhina V.I., Vorotyntsev I.V.</i> Oxidation of chlorosilanes in thin layers .....	653
<i>Mönch E., Potashin S.O., Lindner K., Yahniuk I., Golub L.E., Kachorovskii V.Yu., Bel'kov V.V., Huber R., Watanabe K., Taniguchi T., Eroms J., Weiss D., Ganichev S.D.</i> Photovoltaics of spatially modulated bilayer graphene: evidence of hydrodynamic regime .....	655
<i>Orlova K.N., Simonova A.V., Gradoboev A.V., Zhamaldinov F.F.</i> Radiation Hardness of ALGAINP LEDs with Multiple Quantum Wells to Gamma-Quantum Irradiation .....	658
<i>Otsujil T., Boubanga-Tombet S., Satou A., Yadav D., Ryzhii V., Ryzhii M., Dubinov A.A., Popov V.V., Knap W., Kachorovskii V., Narahara K., Mitin V., Shur M.S.</i> Graphene-based plasmonic metamaterial for terahertz laser transistors.....	660
<i>Zharov A.A., Shadrivov I.V.</i> Dynamical control of the giant resonant Goos–Hanchen shift in nonlinear dielectric nanostructures .....	663
<i>Абрамкин Д.С., Петрушков М.О., Емельянов Е.А., Богомолов Д.Б., Пулято М.А., Гутаковский А.К., Преображенский В.В.</i> Подавление формирования антифазных границ в GaP/GaAs/Si гетероструктурах .....	665
<i>Абросимова Н.Д., Оболенский С.В.</i> Моделирование переходных процессов в транзисторных структурах для аналоговых и радиочастотных СБИС на структурах «кремний на изоляторе» с различными дозами имплантации водорода после воздействия импульсного гамма-излучения .....	667
<i>Абросимова Н.Д., Юнин П.А., Дроздов М.Н., Оболенский С.В.</i> Влияние дозы имплантации водорода на релаксацию электрофизических характеристик структур «кремний на изоляторе» после воздействия рентгеновского излучения.....	669
<i>Авдиенко П.С., Седова И.В., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Трошков С.И., Яговкина М.А., Сорокин С.В.</i> Молекулярно-пучковая эпитаксия и фотолюминесцентные свойства тонких пленок GaTe/GaAs .....	671
<i>Аверина Н.И., Ежевский А.А., Гусейнов Д.В., Сухоруков А.В., Новиков А.В., Юрасов Д.В., Гусев Н.С., Зубанов И.А., Калинина Е.А.</i> Уменьшение вклада от АМР эффекта при детектировании спиновых токов в структурах на основе кремния: Ru/Si:Bi:P.....	673
<i>Аверкиев Н.С., Лифшиц М.Б., Вут Д., Martinez G., Кнар W.</i> Динамическая поляризация ядер в полупроводниках в условиях терагерцового излучения.....	675
<i>Акмаев М.А., Глазов М.М., Кочиев М.В., Винокуров П.В., Смагулова С.А., Белых В.В.</i> Пространственно-временная динамика свободных и связанных экситонов в монослоях MoS <sub>2</sub> .....	676
<i>Алешкин В.Я., Дубинов А.А.</i> Поглощение двумерных плазмонов в структурах с несколькими квантовыми ямами .....	678
<i>Алтухов И.В., Казан М.С., Папроцкий С.К., Хвальковский Н.А., Дижур С.Е., Ильинская Н.Д., Усикова А.А., Баранов А.Н., Teissier R.</i> Туннельный транспорт в сверхрешетках InAs/AlSb с электрическими доменами .....	680
<i>Андрьянов А.И., Сушков А.А., Воронцов В.А., Павлов Д.А., Баясников Д.М., Таран Д.А., Нежданов А.В.</i> Рост и исследование буферных слоев Ge/Si (001) для лазерных структур на основе полупроводников АПВВ .....	682
<i>Антонова И.В.</i> Гетероструктуры на основе фторированного графена для нанозлектроники .....	684
<i>Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Белов П.А., Бабушкин И.В., Розанов Н.Н.</i> Управление наноструктурами на основе прямоугольных квантовых ям с помощью униполярных световых импульсов .....	687
<i>Архипов Е.А., Дроздов М.Н., Краев С.А., Хрыкин О.И., Богданов С.А., Вихарев А.Л., Исаев В.А., Лобаев М.А.</i> Электрофизические свойства дельта-легированных бором слоев алмаза .....	689
<i>Афоненко А.А., Ушаков Д.В., Дубинов А.А., Алешкин В.Я., Морозов С.В., Гавриленко В.И.</i> Моделирование лазерных диодов с длиной волны генерации 3 мкм на основе HgTe/CdHgTe гетероструктур с множественными квантовыми ямами с учетом эффекта горячих фононов .....	691

<i>Афоненко Ан.А., Афоненко А.А., Ушаков Д.В., Хабибуллин Р.А., Васильевский И.С.</i> Перенос носителей заряда в квантово-каскадных гетероструктурах с участием локализованных донорных состояний .....	693
<i>Баграев Н.Т., Кукушкин С.А., Осипов А.В.</i> Наномасштабный монокристаллический карбид кремния на кремнии и его уникальные свойства .....	695
<i>Байдусь Н.В., Алешкин В.Я., Некоркин С.М., Новиков А.В., Самарцев И.В., Юрасов Д.В., Юнин П.А.</i> Электролюминесценция гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs выращенными методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках Ge/Si .....	697
<i>Бекин Н.А.</i> Многофононная релаксация парасостояний триплета 1s в нейтральных донорах магния в кремнии .....	699
<i>Белов Д.А., Иконников А.В., Пушкарев С.С., Галиев Р.Р., Пономарев Д.С., Хохлов Д.Р., Морозов С.В., Гавриленко В.И., Хабибуллин Р.А.</i> Температурные зависимости мощностных и спектральных характеристик квантово-каскадных лазеров с частотами от 2.3 до 4.1 ТГц.....	700
<i>Белоновский А.В., Морозов К.М., Гиришова Е.И., Калитеевский М.А.</i> Взаимодействие экситонов со светом в мезоскопических структурах .....	702
<i>Берковиц В.Л., Кособукин В.А., Улин В.П., Алексеев П.А., Солдатенков Ф.Ю., Левицкий В.С.</i> Структуры Au/GaAs(001) с нанокластерами золота: создание, диагностика, спектроскопия анизотропных плазмонов.....	704
<i>Бибикова В.В., Забавичев И.Ю., Захаров А.М., Карачкин С.В., Кошельчук М.Ю., Полуни И.Н., Потехин А.А., Пузанов А.С., Сафонов А.В., Оболенский С.В.</i> Применение лазерных методов имитации воздействия тяжелых заряженных частиц космического пространства при разработке интегральных схем.....	706
<i>Бобров А.И., Клементьев Д.С., Чигиринский Ю.И., Дудин Ю.А., Негин А.В., Сидоренко К.В., Шушинов А.Н., Еришов А.В., Нежданов А.В., Малехонова Н.В., Боряков А.В., Федонин М.П., Стоякин В.В., Харламов В.А.</i> Особенности формирования планарных световодов для создания фотонных микросхем на кремниевой основе.....	708
<i>Бодров С.Б., Мурзанов А.А., Корытин А.И., Сергеев Ю.А., Степанов А.Н., Чефонов О.В., Овчинников А.В., Агранат М.Б.</i> Новые методы визуализации ТГц изображений .....	710
<i>Боженькина А.Д., Оболенский С.В., Макарецов И.В.</i> Методика многопараметрического анализа влияния эффекта всплеска скорости в канале короткоканальных транзисторов.....	711
<i>Бурдов В.А., Фомичев С.А.</i> Однофотонное возбуждение биэкситонов в объемном кремнии и в кремниевых нанокристаллах .....	713
<i>Бурцев А.А., Киселев А.В., Ионин В.В., Елисеев Н.Н., Михалевский В.А., Лотин А.А.</i> Фазоизменяемые материалы и нейроморфные оптические устройства на их основе .....	714
<i>Васильев Ю.Б.</i> Двумерные плазменные возбуждения в неупорядоченном массиве квантовых антиточек.....	716
<i>Винниченко М.Я., Махов И.С., Устименко Р.В., Фирсов Д.А., Саркисян А.А.</i> Поглощение и фотолюминесценция в инфракрасном диапазоне в легированных квантовых точках GeSi/Si .....	718
<i>Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Меньшиков Р.В., Сидоров Г.Ю., Ужаков И.Н., Якушев М.В.</i> Темновые токи униполярных NBvN структур на основе HgCdTe.....	720
<i>Волков В.А., Заболотных А.А.</i> Свойства магнитоплазмон-поляритонов в 2D электронных системах с тыловым затвором .....	722
<i>Волков О.Ю., Дюжиков И.Н., Хабибуллин Р.А., Дивин Ю.Я.</i> Джозефсоновский спектральный анализ излучения ТГц квантовых каскадных лазеров.....	723
<i>Востоков Н.В., Дроздов М.Н., Краев С.А., Хрыкин О.И., Юнин П.А.</i> Влияние термического отжига на транспортные свойства низкобарьерных диодов Мотта Ti/AlGaN/GaN.....	726
<i>Гадомская А.В., Юлдашева Д.К., Спириин М.Г., Товстун С.А., Разумов В.Ф.</i> Ферстеровский перенос энергии в нанокластерах коллоидных квантовых точек.....	728
<i>Гиришова Е.И., Микитчук Е.П., Морозов К.М., Белоновский А.В., Калитеевский М.А.</i> Оптоакустический генератор ультразвука на базе структур с Таммовским плазмоном с добавлением полимерных и гибридных материалов .....	729
<i>Глазов М.М.</i> Оптические и транспортные свойства двумерных дихалькогенидов переходных металлов .....	731
<i>Глазов С.Ю., Подгорная И.А.</i> Проводимость двумерной сверхрешетки на основе графена в сильных внешних электрических полях с учетом ионизации примеси.....	734
<i>Головатенко А.А., Родина А.В., Aubert T., Samoli M., Lermusiaux L., Zinn T., Abecassis B., Hens Z.</i> Сравнительный анализ спектров поглощения нанокристаллов CdSe со структурой вюрцита и цинковой обманки .....	736
<i>Горбачев А.М., Вихарев А.Л., Лобаев М.А., Радищев Д.Б., Дроздов М.Н., Богданов С.А., Исаев В.А.</i> Создание центров окраски в CVD алмазе и управление их зарядовыми состояниями .....	738
<i>Грибакин Б.Ф., Храмов Е.С., Курдюбов А.С., Трифионов А.В., Игнатьев И.В.</i> Нелинейное уширение экситонных резонансов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs.....	740

<i>Громыко Д.А., Дьяков С.А., Тиходеев С.Г., Гиппиус Н.А.</i> Метод связанных резонансов как эффективный метод расчета оптических спектров периодических наноструктур .....	742
<i>Грязнева Т.А., Демин Г.Д., Дюжнев Н.А.</i> Исследование особенностей полевой эмиссии в полупроводниковом диоде с наноразмерным вакуумным каналом проводимости на базе структур «кремний на изоляторе».....	744
<i>Гудина С.В., Неверов В.Н., Попов М.Р., Подгорных С.М., Шелушинина Н.Г., Якунин М.В., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н.</i> Спин-орбитальное расщепление Рашбы в магнитном поле в квантовых ямах CdHgTe с нормальной и инвертированной зонной структурой .....	746
<i>Гультиков Н.В., Мармалюк А.А., Ладугин М.А.</i> Al-содержащие и Al-free гетероструктуры для полупроводниковых лазерных излучателей спектрального диапазона 760–980 нм: сравнение и анализ .....	748
<i>Гуляев Д.В., Дмитриев Д.В., Колосовский Е.А., Брагинский Л.С., Журавлев К.С.</i> Гетероструктуры InGaAlAs/InAlAs для электрооптического модулятора, полученные методом цифровой эпитаксии .....	750
<i>Гущина Е.В., Дунаевский М.С., Малых Д.А.</i> Исследование трибоэлектрических зарядов в тонких диэлектрических и полупроводниковых пленках методами СЗМ.....	752
<i>Данилов Ю.А., Крюков Р.Н., Лесников В.П., Николичев Д.Е., Зубков С.Ю.</i> Модификация углеродных слоев при высокотемпературном отжиге .....	754
<i>Данилов Ю.А., Вихрова О.В., Здоровейцев А.В., Крюков Р.Н., Лесников В.П., Парафин А.Е., Ильин Н.А., Питуримова Е.А.</i> Легирование слоев GaAs, полученных методом импульсного лазерного нанесения .....	756
<i>Дворецкий С.А., Ступак М.Ф., Михайлов Н.Н., Макаров С.Н., Елесин А.Г., Верхогляд А.Г.</i> Исследование структурного состояния МЛЭ-гетероструктур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs методом генерации второй гармоники.....	758
<i>Дегоев М.М., Афанасьев М.М., Калевич В.К., Кавокин К.В., Козырев Н.В., Karczewski G., Кусраев Ю.Г.</i> Эффект Керра, индуцированный обменным взаимодействием электронов в асимметричных двойных квантовых ямах.....	760
<i>Демидов Е.С., Афанасьев Д.А., Демидова Н.Е., Нежданов А.В., Машин А.И.</i> Влияние времени формирования на люминесцентные, парамагнитные и транспортные свойства пористого кремния .....	762
<i>Дмитриев Д.В., Колосовский Д.А., Торопов А.И., Журавлев К.С.</i> Механизмы удаления оксидного слоя с поверхности InP(001) в потоке As <sub>4</sub> .....	764
<i>Дмитриева О.А., Гиппиус Н.А., Тиходеев С.Г.</i> Мультистабильность экситон-поляритонов в кирально-модулированном микрорезонаторе.....	766
<i>Долгов А.К., Галиев Р.Р., Пушкарев С.С., Афоненко А.А., Ушаков Д.В., Волков О.Ю., Павловский В.В., Дюжиков И.Н., Хабибуллин Р.А.</i> Исследование спектральных характеристик 2.2 ТГц квантово-каскадного лазера с двухсекционным резонатором в зависимости от температуры и тока .....	768
<i>Дорохин М.В., Бастрасова М.В., Мухаматчин К.Р.</i> Моделирование генерации электрон-дырочных пар для бета-вольтаических ячеек Ni <sup>63</sup> /Si .....	770
<i>Дорохин М.В., Ведь М.В., Дикарева Н.В., Демина П.Б., Здоровейцев Д.А., Болдин М.С., Воронин А.В.</i> Люминесцентные свойства наноструктурированного объемного кремния.....	772
<i>Дубинов А.А.</i> Генерация разностной частоты в области «остаточных лучей» GaAs в двухчастотных диодных лазерах .....	774
<i>Дубинов А.А., Алешкин В.Я.</i> Моделирование вертикально излучающего терагерцового HgTe/CdHgTe лазера.....	776
<i>Дунаевский М.С., Алексеев П.А.</i> Исследование упругих деформаций в конических нанопроводах .....	778
<i>Дуров К.В., Мартынов Л.Н., Молостова О.С., Зайцев А.В., Еришов А.В., Крюков Р.Н., Нежданов А.В., Зубков С.Ю., Николичев Д.Е., Сидоренко К.В., Байдусь Н.В.</i> Влияние стехиометрических параметров на свойства пленок SiO <sub>x</sub> и GeO <sub>x</sub> для формирования нанокристаллов.....	780
<i>Европейцев Е.А., Нечаев Д.В., Буренина Д.С., Гусева Ю.А., Задиранов Ю.М., Трошков С.И., Кулагина М.М., Жмерик В.Н., Шубина Т.В., Торопов А.А.</i> Кинетика фотолуминесценции латерально локализованных экситонов в атомарно тонких квантовых ямах GaN/AlN.....	782
<i>Жидяев К.С., Некоркин С.М., Байдусь Н.В., Чигинева А.Б., Самарцев И.В., Крюков А.В., Токарев В.А., Баклашов Д.И.</i> Генерация оптических импульсов наносекундного диапазона в многоямных InGaAs/GaAs/AlGaAs гетеролазерах с увеличенной активной областью .....	784
<i>Жмерик В.Н., Нечаев Д.В., Семенов А.Н., Орехова К.Н., Яговкина М.А., Алексеев П.А., Бородин Б., Европейцев Е.А., Трошков С.И., Кулагина М.М., Гусева Ю.А., Березина Д.С., Шубина Т.В., Козловский В.И., Зверев М.М., Свиридов Д.Е., Гамов Н.А., Торопов А.А., Иванов С.В.</i> Монослойные квантовые ямы GaN/AlN: технология и применения в ультрафиолетовой фотонике от мощных излучателей до эмиттеров одиночных фотонов.....	786
<i>Жолудев М.С., Морозов С.В.</i> Расчет локализованных и резонансных состояний акцепторов в твердом растворе CdHgTe .....	788

<i>Жукавин Р.Х., Бушуйкин П.А., Кукотенко В.В., Чопорова Ю.Ю., Дефтманн Н., Ковалевский К.А., Цыпленков В.В., Герасимов В.В., Осинцева Н.Д., Князев Б.А., Абросимов Н.В., Шастин В.Н.</i> Наблюдение осцилляций Рамсея в германии, легированном мелкими донорами.....	790
<i>Жуков А.О., Нежданов А.В., Шестаков Д.В., Скрылев А.А., Машин А.И., Усанов Д.А., De Filipo G., Ершов А.В.</i> Структурные и оптические свойства пленок TiO <sub>x</sub> .....	792
<i>Жуков Н.Д., Хазанов А.А.</i> О механизмах фотолуминесценции в коллоидных квантовых точках.....	794
<i>Забавичев И.Ю., Пузанов А.С., Оболенский С.В.</i> Влияние процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных транзисторных структур.....	797
<i>Заболотных А.А.</i> Плазмонные солитоны в экранированных двумерных электронных системах.....	799
<i>Заболотных А.А., Еналдиев В.В., Волков В.А.</i> Квазистационарные плазмоны в частично экранированных двумерных электронных системах.....	800
<i>Загороднев И.В., Родионов Д.А., Заболотных А.А.</i> Эффекты запаздывания в плазменных колебаниях 2D диска.....	801
<i>Зазымкина Д.А., Ченцов С.И., Аминев Д.Ф., Николаев С.Н., Кривобок В.С.</i> Новый люминесцентный центр, связанный с переходными элементами, в кристаллическом диоксиде титана.....	802
<i>Зайцев А.В., Ершов А.В., Дуров К.В., Нежданов А.В., Крюков Р.Н., Зубков С.Ю., Николитев Д.Е., Байдусь Н.В., Левин А.А., Байдакова М.В.</i> Особенности оптических и морфологических свойств отожженных многослойных наноструктур Ge/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и Ge/Si/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	804
<i>Захожев К.Е., Роголо Д.И., Пономарев С.А.</i> Зависимость поверхностного потенциала пленки β-In <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> на поверхности Si(111) от ее толщины.....	806
<i>Здоровейцев Д.А., Дорохин М.В., Кузнецов Ю.М., Демина П.Б., Ерофеева И.В., Здоровейцев А.В., Завражнов А.Ю., Веде М.В., Воронин А.В.</i> Способ легирования фосфором Ge <sub>x</sub> Si <sub>1-x</sub> в методе электроимпульсного плазменного спекания.....	808
<i>Зиновьев В.А., Дерябин С.А., Володин В.А., Зиновьева А.Ф., Черкова С.Г., Смагина Ж.В., Двуреченский А.В., Крупин А.Ю., Бородавченко О.М., Живулько В.Д., Мудрый А.В.</i> Структурные и оптические свойства двумерных слоев Si и Ge, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках CaF <sub>2</sub> /Si(111).....	810
<i>Зиновьев В.А., Смагина Ж.В., Рудин С.А., Новиков П.Л.</i> Группы наностроекков Ge, выращиваемых снаружи от ямок на структурированных подложках Si.....	812
<i>Зубанов И.А., Ежеский А.А., Сенников П.Г., Гусейнов Д.В., Сухоруков А.В., Калинина Е.А., Абросимов Н.В., Аверина Н.И.</i> Доноры лития в объемных монокристаллических моноизотопных сплавах 28Si <sub>(1-x)</sub> 72Ge <sub>(x)</sub> .....	814
<i>Иванов А.С., Павельев Д.Г., Оболенский С.В., Оболенская Е.С.</i> Радиационная стойкость источника субтерагерцового излучения после нейтронного воздействия.....	816
<i>Иго А.В.</i> Степень поляризации комбинационного рассеяния света в нанокристаллах кремния.....	818
<i>Ищенко Д.В., Ахундов И.О., Голяшов В.А., Степина Н.П., Тарасов А.С., Федосенко Е.В., Терещенко О.Е.</i> Рост методом МЛЭ Ван-дер-Ваальсовых материалов на Si(111).....	820
<i>Кавеев А.К., Терещенко О.Е.</i> Оптимизация буферного диэлектрического слоя для создания малодефектных эпитаксиальных пленок топологического изолятора Pb <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> Te с $x \geq 0.4$ .....	822
<i>Казанов Д.Р., Пошакинский А.В., Елисеев И.А., Бородин Б.Р., Павлов С.И., Шубина Т.В.</i> Оптика спиральных нанотрубок на основе MoS <sub>2</sub> .....	826
<i>Калинников М.А., Лобанов Д.Н., Андреев Б.А., Кудрявцев К.Е., Юнин П.А., Скороходов Е.В., Новиков А.В., Красильник З.Ф.</i> Формирование эпитаксиальных слоев InGaN для источников видимого красного и ИК диапазонов методом ПА МПЭ на сапфире.....	830
<i>Калитеевский М.А., Резник Р.Р., Цырлин Г.Е., Котляр К.П., Илькив И.В., Акоюн Н., Леонардо Л., Николаев В.В., Белоновский А.В.</i> Эффект Парселла и коллимация излучения в гибридных нанопроводах AlGaAs с квантовыми точками GaAs.....	832
<i>Карлина Л.Б., Власов А.С., Илькив И.В., Вершинин А.В., Котляр К.П., Драгунова А.С., Крыжановская Н.В., Сошников И.П.</i> Особенности роста наноструктур InP на Si(111) в квазиравновесных условиях.....	834
<i>Климов А.Э., Ахундов И.О., Голяшов В.А., Горшков Д.В., Ищенко Д.В., Пащин Н.С., Сидоров Г.Ю., Супрун С.П., Тарасов А.С., Федосенко Е.В., Терещенко О.Е.</i> Температурные особенности свойств транзисторной МДП структуры на основе пленки топологического кристаллического изолятора PbSnTe:In.....	836
<i>Клоков А.Ю., Фролов Н.Ю., Шарков А.И., Николаев С.Н., Ченцов С.И., Чернопицкий М.А., Пугачев М.В., Дулебо А.И., Шуплецов А.В., Кривобок В.С., Кунцевич А.Ю.</i> Акустические свойства слоев и интерфейсов в Ван-дер-Ваальсовых гетероструктурах hBN/WSe <sub>2</sub> /hBN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в диапазоне частот до 150 ГГц.....	838
<i>Клочков А.Н., Виниченко А.Н., Сафонов Д.А., Смирнова М.О., Тимофеев А.А., Васильевский И.С.</i> Пленки n-InAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из сапфира.....	840

<i>Ковалевский К.А., Жукавин Р.Х., Шастин В.Н.</i> Фотолуминесценция доноров мышьяка в Ge .....	842
<i>Козлов Д.В., Румянцев В.В., Морозов С.В., Гавриленко В.И., Hübers Н.-W.</i> Захват дырок на состоянии вакансий ртуты в узко зонных слоях HgCdTe с испусканием одиночного акустического фонона .....	844
<i>Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Кривобок В.С., Аминев Д.Ф.</i> Излучательный внутрицентровый переход в ионе Fe <sup>2+</sup> в теллуриде кадмия .....	846
<i>Колосовский Д.А., Дмитриев Д.В., Пономарев С.А., Торопов А.И., Журавлев К.С.</i> Образование бинарного InAs на поверхности InP(001) при отжиге в потоке мышьяка .....	848
<i>Коляда Д.В., Фирсов Д.Д., Тимофеев В.А., Машанов В.И., Караборчев А.А., Комков О.С.</i> Исследование влияния отжига на инфракрасную фотолуминесценцию наногетероструктур GeSiSn/Si .....	850
<i>Королев Д.С., Никольская А.А., Матюнина К.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., Нежданов А.В., Крюков Р.Н., Здорвейцев А.В., Конаков А.А., Тетельбаум Д.И.</i> Ионно-лучевой синтез нанокристаллов оксида галлия в диэлектрических матрицах .....	852
<i>Короткова М.Г., Дорохин М.В., Кузнецов Ю.М., Демина П.Б., Ерофеева И.В., Ведь М.В., Воронин А.В.</i> Исследование теплопроводности твердых растворов Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> , полученных методом электроимпульсного плазменного спекания .....	854
<i>Коротнева А.Р., Белых В.В., Собьянин Д.Н.</i> Резонансное спиновое усиление в условиях электронного парамагнитного резонанса .....	856
<i>Коряжкина М.Н., Филатов Д.О., Шенина М.Е., Антонов И.Н., Круглов А.В., Еришов А.В., Горшков А.П., Окишев Р.Ю., Денисов С.А., Чалков В.Ю., Шенгуров В.Г.</i> Исследование влияния оптического излучения на резистивное переключение МДП-структур на основе ZrO <sub>2</sub> (Y) на подложках Si(001) с наноструктурами Ge .....	858
<i>Котова Л.В., Рахлин М.В., Галимов А.И., Пошакинский А.В., Платонов А.В., Шубина Т.В.</i> Оптические свойства ван-дер-ваальсовых гомоструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов .....	860
<i>Кочаровская Е.Р., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Малкин А.М., Заславский В.Ю.</i> Динамика широкоапертурных гетеролазеров со сбоем фазы гофрировки брэгговского резонатора .....	862
<i>Кочаровская Е.Р., Мишин А.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В.</i> Поляритонные резонансы в автомодуляции сверхизлучающих лазеров .....	864
<i>Кочаровский Вл.В., Кочаровская Е.Р., Мишин А.В., Кочаровский В.В.</i> Диссипативный сверхизлучательный фазовый переход в системе активных центров с некогерентной непрерывной накачкой в низкодобротном резонаторе Фабри-Перо .....	866
<i>Красильников А.В., Родионов Н.Б., Большаков А.П., Ральченко В.Г., Вартапетов С.К., Сизов Ю.Е., Мещанинов С.А., Трапезников А.Г., Родионова В.П., Амосов В.Н., Хмельницкий Р.А., Кириченко А.Н.</i> Синтез CVD-алмаза детекторного качества для спектрометрии ионизирующих излучений .....	869
<i>Кривобок В.С., Николаев С.Н., Багаев В.С., Онищенко Е.Е., Ченцов С.И., Пручкина А.А.</i> Нестандартные особенности взаимодействия одиночных люминесцентных центров, сформированных ядрами частичных дислокаций в CdTe и ZnSe, с продольными оптическими фононами .....	871
<i>Криштон В.Г., Попов В.Г., Дворецкий Д.А., Бугай К.Е.</i> Рамановское охлаждение в субмикронных аттенуаторах, легированных оптически активными примесями .....	873
<i>Крюков Р.Н., Захаров В.Е., Николитчев Д.Е., Зубков С.Ю., Дорохин М.В., Звонков Б.Н.</i> Влияние температуры роста на свойства системы GaAs/дельта-Mn .....	877
<i>Кудрин А.В., Лесников В.П., Яковлева А.А., Крюков Р.Н.</i> Эпитаксиальные слои магнитного полупроводника InGaAs:Fe .....	879
<i>Кудрявцев К.Е., Румянцев В.В., Уточкин В.В., Алешкин В.Я., Дубинов А.А., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Гавриленко В.И., Морозов С.В.</i> Лазерные гетероструктуры с КЯ HgTe/CdHgTe среднего ИК диапазона: анализ ОЖЕ-процессов и температурного гашения стимулированного излучения .....	881
<i>Кузнецова И.А., Савенко О.В.</i> Взаимодействие электромагнитной Н-волны с полупроводниковым нанослоем .....	883
<i>Кузнецова М.С., Евдокимов А.Е., Михайлов А.В., Кавокин К.В., Джисоев Р.И.</i> Времена ядерной спиновой релаксации в структурах GaAs:Mn .....	885
<i>Кукушкин В.А., Лобаев М.А., Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Радищев Д.Б., Архипова Е.А., Дроздов М.Н., Исаев В.А., Богданов С.А.</i> Экспериментальное и теоретическое исследование легированных бором дельта-слоев осажденного из газовой фазы алмаза для обеспечения высокой подвижности дырок .....	887
<i>Кулаковский В.Д., Деменев А.А., Терешко С.Н., Гиппиус Н.А.</i> Неравновесная динамика экситонных поляритонов в высокодобротных GaAs микрорезонаторах .....	889
<i>Кулебякина Е.В., Скориков М.Л., Колобкова Е.В., Белых В.В.</i> Оптические свойства и фазовый переход в нанокристаллах перовскитов CsPb(Cl,Br) <sub>3</sub> .....	891
<i>Лебедев А.А., Давыдов В.Ю., Лебедев С.П., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Новиков С.Н., Усиков А.С., Макаров Ю.Н.</i> Газовые и биосенсоры на основе структур graphene/SiC .....	893

<i>Лебедев М.В., Львова Т.В., Смирнов А.Н., Давыдов В.Ю., Королева А.В., Жижин Е.В., Лебедев С.В.</i> Электронная структура пассивированных поверхностей n-InP(100) .....	895
<i>Лебединская А.Е., Кабальнов Ю.А., Труфанов А.Н., Оболенский С.В.</i> Влияние особенностей конструкции диодных оптоэлектронных пар на стойкость к гамма-нейтронному излучению.....	897
<i>Леонтьев А.В., Чибирев А.О., Гарифьянов Н.Н., Мамин Р.Ф.</i> Проводящие свойства интерфейса между сегнетоэлектриком и диэлектриком гетероструктур Ba <sub>0.8</sub> Sr <sub>0.2</sub> TiO <sub>3</sub> /LaMnO <sub>3</sub> .....	899
<i>Литвяк В.М., Чербунин Р.В., Калевич В.К., Лихачев А.И., Нащекин А.В., Владимирова М., Кавокин К.В.</i> Проявление квадрупольных взаимодействий в спектрах радиочастотного поглощения объемных кристаллов n-GaAs .....	901
<i>Лобанов Д.Н., Андреев Б.А., Кудрявцев К.Е., Красильникова Л.В., Юнин П.А., Скороходов Е.В., Калинин М.А., Новиков А.В., Красильник З.Ф.</i> Влияние температуры роста на стимулированное излучение в ИК диапазоне InGaN слоев, полученных методом МПЭ ПА.....	903
<i>Логинов А.Б., Бокова-Сирош С.Н., Логинов Б.А., Исмагилов Р.Р., Образцов А.Н.</i> Сравнительный анализ свойств пленок наноструктурированных двумерных материалов, полученных различными методами CVD синтеза .....	905
<i>Лозовой К.А., Дирко В.В., Коханенко А.П., Кукунов О.И., Винарский В.П.</i> Динамика сверхструктурных переходов при низкотемпературном росте наноструктур по Странскому-Крастанову.....	907
<i>Майдэбура Я.Е., Мансуров В.Г., Малин Т.В., Журавлев К.С.</i> 2D-3D переход, стимулированный изменением элементного состава на поверхности слоя GaN.....	908
<i>Максимов А.А., Филатов Е.В., Тартаковский И.И.</i> Кинетика генерации циркулярно-поляризованного света полупроводниковым инжекционным лазером при возбуждении прямоугольными электрическими импульсами .....	910
<i>Мармалюк А.А., Волков Н.А., Гулькиков Н.В., Рябоштан Ю.Л., Ладугин М.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Шестак Л.И., Козырев А.А., Панарин В.А.</i> Полупроводниковые гетероструктуры для мощных лазерных диодов повышенной эффективности .....	912
<i>Милахин Д.С., Малин Т.В., Мансуров В.Г., Галицын Ю.Г., Кожухов А.С., Новикова Н.Н., Яковлев В.А., Журавлев К.С.</i> Характеризация тонких пленок AlN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира .....	914
<i>Миньков Г.М., Шерстобитов А.А., Алешкин В.Я., Рут О.Э., Германенко А.В., Михайлов Н.Н.</i> Энергетический спектр и магнитотранспорт квантовых ям HgTe при переходе от состояния 2D к состоянию 3D топологического изолятора .....	916
<i>Михайлов А.В., Трифионов А.В., Султанов О.С., Югова И.Ю., Игнатьев И.В.</i> Квантовые биения экситонов с легкими и тяжелыми дырками в спектрах отражения в квантовой яме GaAs/AlGaAs .....	918
<i>Михайлов Н.Н., Алешкин В.Я., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н., Швец В.А.</i> Исследование энергетического положения уровней размерного квантования в множественных квантовых ямах Cd <sub>y</sub> Hg <sub>1-y</sub> Te/Cd <sub>x</sub> Hg <sub>1-x</sub> Te/Cd <sub>y</sub> Hg <sub>1-y</sub> Te .....	920
<i>Михайлова А.М., Ревин А.А., Конаков А.А., Цыпленков В.В., Шастин В.Н.</i> Электронные состояния двухзарядных доноров в германии .....	922
<i>Михалюк А.Н., Бондаренко Л.В., Тупчая А.Ю., Утас Т.В., Грузнев Д.В., Еремеев С.В., Зотов А.В., Саранин А.А.</i> Модификация электронных свойств поверхности Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au вызванная адсорбцией адатомов Cr .....	924
<i>Мозунов Я.А., Lysenko S., Федянин А.Е., Fernández F., Rúa A., Kent A.J., Акимов А.В., Калашиникова А.М.</i> Генерация пикосекундных импульсов деформации при сверхбыстром структурном фазовом переходе в тонких пленках VO <sub>2</sub> .....	926
<i>Моиссенко И.М., Фатеев Д.В., Попов В.В.</i> Терагерцевые плазмоны в графене с постоянным током, направленным перпендикулярно распространению плазмонов .....	928
<i>Морозов К.М., Белоновский А.В., Гиришова Е.И., Калитеевский М.А.</i> Сильная экситон-плазменная связь в структурах с таммовским плазмоном и экситоном в органическом материале .....	930
<i>Морозов М.Ю., Попов В.В.</i> Терагерцевые плазмоны в желобковом волноводе с графеном: характеристики и возможность возбуждения .....	932
<i>Морозов С.В., Уточкин В.В., Фадеев М.А., Румянцев В.В., Кудрявцев К.Е., Гавриленко В.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А.</i> Влияние ОЖЕ-рекомбинации, модовых потерь и разогрева носителей на критическую температуру генерации стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в диапазоне 3–31 мкм .....	934
<i>Мумляков А.М., Шибалов М.В., Порохов Н.В., Зенова Е.В., Тархов М.А.</i> Планарные емкостные элементы на основе углеродных наностенок .....	936
<i>Набиуллин И.С., Клочков А.Н., Горелов А.А., Виниченко А.Н., Васильевский И.С.</i> Электролюминесценция InGaAs/AlGaAs/GaAs-структур с р-областью, полученной путем диффузии цинка из металлического слоя .....	939



<i>Нагаев К.Э.</i> Электрон-электронное рассеяние и проводимость систем с галилеевски инвариантным спектром .....	942
<i>Настовьяк А.Г., Штеренталь Д.В., Неизвестный И.Г., Шварц Н.Л.</i> Моделирование отжига нанопроволок GaAs .....	944
<i>Нежданов А.В., Скрылев А.А., Маркелов А.С., Машин А.И., Шестаков Д.В., Жуков А.О., Усанов Д.А., De Filipo G.</i> Оптические и фотоэлектрические свойства пленок ZnSnN <sub>2</sub> полученных методом магнетронного распыления .....	946
<i>Некоркин С.М., Байдусь Н.В., Самарцев А.В., Жидяев К.С., Чигинева А.Б., Орлова А.Н., Павлов Д.А., Афоненко А.А., Ушаков Д.В.</i> Особенности генерации волноводных мод в многоямных гетеролазерах .....	948
<i>Некоркин С.М., Звонков Б.Н., Жидяев К.С., Самарцев И.В., Чигинева А.Б., Чеченин Ю.И., Щитов А.М., Чиликов А.А., Панков С.В.</i> Разработка и исследование эпитаксиальных структур InP на GaAs подложках .....	950
<i>Никитин М.В., Покровский В.Я., Зыбцев С.Г., Колесов В.В., Кашин В.В., Логинов Б.А.</i> Синхронизация скольжения волн зарядовой плотности механическими колебаниями .....	952
<i>Николаев С.Н., Чернопицкий М.А., Багаев В.С., Усманов И.И., Онищенко Е.Е., Деева А.А., Кривобок В.С.</i> Фотолюминесценция протяженных дефектов в монослое WSe <sub>2</sub> .....	954
<i>Николаев И.Д., Меницков Р.В., Михайлов Н.Н., Хохлов Д.Р., Иконников А.В.</i> Остаточная фотопроводимость в двойных квантовых ямах HgTe .....	956
<i>Никольская А.А., Королев Д.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., Конаков А.А., Павлов Д.А., Galeckas A., Азаров А.Ю., Кузнецов А.Ю., Тетельбаум Д.И.</i> Влияние химической природы имплантированных в систему SiO <sub>2</sub> /Si атомов на фотолюминесценцию ионно-синтезированного гексагонального кремния фазы 9R-Si .....	958
<i>Окулич Е.В., Окулич В.И., Михайлов А.Н., Тетельбаум Д.И.</i> Моделирование процессов самоотжига filamentных структур в мемристорах на основе пленок α-SiO <sub>2</sub> , подвергнутых облучению ионами Si <sup>+</sup> .....	960
<i>Орлова Н.Н., Тимонина А.В., Колесников Н.Н., Девятков Э.В.</i> Реализация концепции полярного металла в Ван дер Ваальсовых структурах .....	962
<i>Осинных И.В., Александров И.А., Малин Т.В., Милахин Д.С., Журавлев К.С.</i> Определение типов оптических переходов по зависимости интенсивности фотолюминесценции от мощности возбуждения в компенсированных полупроводниках .....	964
<i>Осинных И.В., Малин Т.В., Кожухов А.С., Журавлев К.С., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю.</i> Трансформация N-полярных инверсионных доменов из буферных слоев AlN в процессе роста слоев AlGaN .....	966
<i>Оханкин А.И., Краев С.А., Архипова Е.А., Юнин П.А., Данильцев В.М., Хрыкин О.И., Дроздов М.Н.</i> Влияние параметров индуктивно-связанной плазмы хлорпентафторэтана на скорость и характеристики травления арсенида галлия .....	968
<i>Павлова Т.В., Шевлюга В.М.</i> Двухэлектронные переходы на оборванной связи кремния .....	970
<i>Папроцкий С.К., Алтухов И.В., Казан М.С., Хвальковский Н.А., Дижур С.Е., Родионов Н.Б., Большаков А.П., Ральченко В.Г., Хмельницкий Р.А.</i> Проводимость монокристаллических пленок алмаза, легированного бором .....	972
<i>Перетокин А.В., Степихова М.В., Новиков А.В., Смагина Ж.В., Дьяков С.А.</i> Экспериментальное исследование люминесцентных свойств двумерных фотонных кристаллов с упорядоченными наноструктурами Ge(Si) при различных подходах к упорядочению .....	974
<i>Пермякова О.О., Рогожин А.Е., Мьяконьких А.В., Руденко К.В.</i> Изменение механизма резистивного переключения в структуре на основе оксида гафния .....	976
<i>Перов А.А., Пикунов П.В.</i> Поперечный термомагнитный эффект в планарных полупроводниковых сверхрешетках без центра инверсии .....	978
<i>Подгаецкий К.А., Козлов Ю.Ю., Лобинцов А.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А.</i> Анализ и расчет металлodieлектрических зеркал для квантовых каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона .....	980
<i>Покровский В.Я., Никонов С.А., Зыбцев С.Г.</i> Динамика скольжения волны зарядовой плотности в условиях синхронизации ВЧ-СВЧ полями .....	982
<i>Полищук О.В., Фатеев Д.В., Попов В.В.</i> Усиление терагерцового излучения в экранированном графене на резонансах Фано с учетом пространственной дисперсии .....	984
<i>Пономарев С.А., Роголо Д.И., Щеглов Д.В., Латышев А.В.</i> Структурные и морфологические трансформации слоистых халькогенидов металлов при сублимации и эпитаксиальном росте .....	986
<i>Попов В.Г.</i> Лазерное охлаждение однофотонных источников комбинационным рассеянием света в антистоксовском режиме .....	988
<i>Потехин А.А., Пузанов А.С., Тарасова Е.А., Оболенский С.В.</i> Моделирование поведения субмикронных полупроводниковых структур после стабилизации кластера радиационных дефектов .....	990

<i>Разова А.А., Румянцев В.В., Алешкин В.Я., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Морозов С.В., Orlita M.</i> Исследования спектров фотопроводимости, магнитопротускания и длинноволнового стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe .....	992
<i>Резник Р.Р., Котляр К.П., Гридчин В.О., Убийвовк Е.В., Драгунова А.С., Крыжановская Н.В., Акупян Н., Цырлин Г.Э.</i> III–V наноструктуры комбинированной размерности на поверхности кремния.....	994
<i>Рудаков А.О., Алешкин В.Я.</i> Усиление плазмонов в многоямных гетероструктурах HgTe/CdHgTe .....	996
<i>Рудык Н.Н., Ильин О.И., Осотова О.И., Польшянова М.Р., Ильина М.В.</i> Управление типом и концентрацией азотных дефектов в вертикально ориентированных УНТ .....	998
<i>Румянцев В.В., Дубинов А.А., Уточкин В.В., Антонов А.В., Фадеев М.А., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Гавриленко В.И., Морозов С.В.</i> Длинноволновое стимулированное излучение в структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при непрерывной оптической накачке с интенсивностью $\sim 1$ Вт/см <sup>2</sup> .....	1000
<i>Рыбкина А.А., Фильнов С.О., Тарасов А.В., Ерыженков А.В., Глазкова Д.А., Пудиков Д.А., Лихолетова М.В., Шикин А.М., Рыбкин А.Г.</i> Интеркаляция буферного слоя графена на SiC(0001) атомами Со и Au для применения в спинтронике.....	1002
<i>Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Таланов Ю.И., Тейтельбаум Г.Б.</i> Электронные и дырочные капли в топологическом изоляторе $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ : спиновый резонанс и влияние на транспортные свойства .....	1004
<i>Семиков Д.А., Волков П.В., Архипова Е.А., Вопилкин Е.А., Горюнов А.В., Краев С.А., Лукьянов А.Ю., Охапкин А.И., Тертышник А.Д.</i> Применение LIGA-технологии для создания матрицы МОЭМС.....	1006
<i>Скоморохов А.М., Бреев И.Д., Вейшторт И.П., Нагалюк С.С., Мохов Е.Н., Баранов П.Г., Анисимо А.Н.</i> Исследование влияния механических напряжений на расщепление спиновых подуровней в гетероструктурах AlN/SiC .....	1008
<i>Слипченко С.О., Шашкин И.С., Лешко А.Ю., Копьев П.С., Пихтин Н.А.</i> Мощные одномодовые лазерные диоды и линейки на основе InGaAs/AlGaAs асимметричных гетероструктур .....	1010
<i>Смагина Ж.В., Степихова М.В., Зиновьев В.А., Перетокин А.В., Дьяков С.А., Родякина Е.Е., Новиков А.В., Двуреческий А.В.</i> Светоизлучающие структуры на основе пространственно упорядоченных GeSi квантовых точек, встроенных в фотонные кристаллы .....	1012
<i>Смирнов А.М., Манцевич В.Н., Васильев Р.Б., Днепровский В.С.</i> Перестраиваемый синий сдвиг фотолюминесценции в нанотетраподах CdTe/CdSe.....	1014
<i>Степина Н.П., Голяшов В.А., Ненашев А.В., Терещенко О.Е., Баженов А.О., Коптев Е.С., Кох К.А., Голдырева Е.С., Антонова И.В., Рыбин М.Г., Образцова Е.Д.</i> Магнетотранспорт пленок топологических изоляторов на основе халькогенидов висмута .....	1017
<i>Степихова М.В., Вербус В.А., Барышникова К.В., Петров М.И., Rutckaia V.V., Перетокин А.В., Юрасов Д.В., Шенуров Д.В., Новиков А.В.</i> Резонансные явления в люминесцентном отклике одиночных цилиндрических резонаторов и их цепочек, сформированных на кремниевых структурах с наноструктурами Ge(Si) .....	1019
<i>Степихова М.В., Дьяков С.А., Яблонский А.Н., Перетокин А.В., Юрасов Д.В., Смагина Ж.В., Новиков А.В., Красильник З.Ф.</i> Связанные состояния в континууме в люминесцентном отклике фотонных кристаллов с квадратной и гексагональной решетками отверстий, сформированных на структурах с наноструктурами Ge(Si).....	1021
<i>Сторожевых М.С., Арапкина Л.В., Новиков С.М., Волков В.С., Арсенин А.В., Уваров О.В., Юрьев В.А.</i> Особенности Рамановского рассеяния на гетероструктурах Ge/Si с низкотемпературными квантовыми точками Ge.....	1023
<i>Тарасов А.С., Голяшов В.А., Ахундов И.О., Ищенко Д.В., Кожухов А.С., Кох К.А., Терещенко О.Е.</i> Получение атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей топологических изоляторов AVbVI.....	1025
<i>Тарасова Е.А., Хазанова С.В., Голиков О.Л., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Кодочигов Н.Е., Земляков В.Е.</i> Анализ нелинейных искажений DrNEMT структур на основе соединения GaAs/InGaAs с двусторонним дельта-легированием .....	1027
<i>Терещенко О.Е., Голяшов В.А., Николенко А.Д., Бухтияров А.В., Зубавичус Я.В.</i> Фотоэмиссионная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением в изучении квантовых материалов: возможности новой установки в ИФП СО РАН и ARPES станции на синхротронном источнике СКИФ .....	1029
<i>Тетельбаум Д.И., Никольская А.А., Королев Д.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., Кудрин А.В., Нежданов А.В., Трушин В.Н., Питиримова Е.А., Павлов Д.А., Николичев Д.Е., Крюков Р.Н., Kumar M., Giulian R.</i> Влияние имплантации ионов Si <sup>+</sup> на структуру и свойства бета-Ga <sup>2</sup> O <sup>3</sup> .....	1031
<i>Тимофеев В.А., Блошкин А.А., Машанов В.И., Скворцов И.В., Никифоров А.И., Кириенко В.В., Лошкарев И.Д., Фирсов Д.Д., Комков О.С.</i> Красная граница фотопроводимости в структуре с множественными квантовыми ямами GeSiSn/Si .....	1033

<i>Титова А.М., Денисов С.А., Чалков В.Ю., Алябина Н.А., Шенгуров В.Г.</i> Распределение концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях Ge и GeSn, выращенных на $n^+$ -Si(001) подложках.....	1035
<i>Уточкин В.В., Фадеев М.А., Румянцев В.В., Кудряцев К.Е., Трошкин А.О., Гавриленко В.И., Михайлов Н.Н., Морозова Е.Е., Шенгуров Д.В., Морозов С.В.</i> Генерация стимулированного излучения в районе 4 мкм в HgCdTe структуре с микродисковыми резонаторами при температурах, достижимых при термоэлектрическом охлаждении .....	1037
<i>Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Хабибуллин Р.А., Васильевский А.А., Гавриленко В.И.</i> Новые дизайны лазерных переходов квантово-каскадных структур ТГц диапазона для получения высокой мощности и для работы при повышенных температурах.....	1039
<i>Фатеев Д.В., Моисеенко И.М., Попов В.В.</i> Усиление терагерцового излучения в графене с постоянным дрейфом за счет колебаний динамической массы электронов.....	1041
<i>Хабибуллин Р.А., Афоненко А.А., Ушаков Д.В., Пушкарев С.С., Галиев Р.Р., Пономарев Д.С., Васильевский И.С., Клочков А.Н., Виниченко А.Н., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Мармалюк А.А., Маремьянин К.В., Гавриленко В.И.</i> ТГц квантово-каскадные лазеры с испусканием двух фотонов в одном усиливающем модуле, выращенные методами МЛЭ и МОС-гидридной эпитаксии .....	1043
<i>Хазанова С.В., Голиков О.Л., Пузанов А.С., Тарасова Е.А., Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Оболенская Е.С., Иванов А.С., Павельев Д.Г., Оболенский С.В.</i> Моделирование неоднородностей ВАХ и пробоя в сверхрешетках с малым числом периодов .....	1045
<i>Хазанова С.В., Савельев В.В.</i> Расчет вольт-амперных характеристик структур на основе двуслойного графена.....	1047
<i>Хазанова С.В., Сидоренко К.В., Бобров А.И., Байдусь Н.В., Горшков А.П., Нежданов А.В., Панфилов А.С., Юртова Л.И., Шушунов А.Н., Малехонова Н.А.</i> Изменение показателя преломления двойных туннельно-связанных InGaAs/AlGaAs/GaAs квантовых ям под действием электрического поля.....	1049
<i>Хахулин С.А., Фирсов Д.Д., Комков О.С.</i> Установка для измерений методом спектроскопии анизотропного отражения в среднем инфракрасном диапазоне .....	1051
<i>Хомицкий Д.В., Студеникин С.А., Шерман Е.Я.</i> Спин-зависимое туннелирование в двойной квантовой точке со спин-орбитальным взаимодействием в условиях ЭДСР .....	1053
<i>Хорошилов В.С., Протопопов Д.Е., Казанцев Д.М., Альперович В.Л.</i> Влияние фотоэда на фотоэмиссию из $p^+$ -GaAs(Cs,O) с положительным и отрицательным электронным средством .....	1055
<i>Цыпленков В.В., Шастин В.Н.</i> Фотонное эхо в германии с мелкими донорами .....	1057
<i>Черненко А.В., Бричкин А.С.</i> Влияние толщины инкапсулирующих слоев на качество гетероструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов .....	1059
<i>Чигинева А.Б., Байдусь Н.В., Некоркин С.М., Жидяев К.С., Кукушкин В.А.</i> Оптимизация параметров ГФЭ МОС GaAs тиристорных структур, для увеличения напряжения их переключения .....	1061
<i>Шамирзаев Т.С., Смирнов Д.С., Шумилин А.В., Яковлев Д.Р., Вайер М.</i> Динамическая спиновая поляризация электронов .....	1063
<i>Шандыба Н.А., Черненко Н.Е., Балакирев С.В., Еременко М.М., Кириченко Д.В., Солодовник М.С.</i> Исследование влияния дозы ионно-лучевой обработки поверхности Si(111) на процессы роста нитевидных нанокристаллов GaAs.....	1065
<i>Шастин В.Н., Жукавин Р.Х., Ковалевский К.А., Павлов С.Г., Deftann N., Pohl A., Цыпленков В.В., Абросимов Н.В., Rietann H., Hübers H.-W.</i> Влияние одноосной деформации кристалла на стимулированное излучение оптически возбуждаемых доноров V группы в кремнии .....	1067
<i>Шевырин А.А., Погосов А.Г., Бакаров А.К., Шкляев А.А.</i> Полупроводниковые нанозлектромеханические системы: возбуждение и затухание колебаний.....	1069
<i>Шенина М.Е., Антонов И.Н., Горшков О.Н., Филатов Д.О., Коряжскина М.Н.</i> Зависимость параметров резистивного переключения в мемристорах Ta/ZrO <sub>2</sub> (Y)/Pt от условий формирования активного электрода.....	1071
<i>Широких Н.С., Николичев Д.Е., Зубков С.Ю., Крюков Р.Н., Дорохин М.В., Дудин Ю.А., Кузнецов Ю.М.</i> Влияние термического отжига на химический состав системы Si:Co .....	1073
<i>Шоболова Т.А., Гасенин В.В., Шоболов Е.Л., Оболенский С.В.</i> Ток утечки через подзатворный диэлектрик в транзисторах с длиной канала до 100 нм .....	1075
<i>Штром И.В., Резник Р.Р., Гридчин В.О., Бородин Б.Р., Котляр К.П., Алексеев П., Цырлин Г.Е.</i> Электрические свойства AlGaAs нитевидных нанокристаллов типа «ядро-оболочка» .....	1077
<i>Энтин М.В., Махмудиан Мехрдад М., Махмудиан М.М.</i> Теория двумерного вигнеровского кластера .....	1079
<i>Якунин М.В., Алешкин В.Я., Подгорных С.М., Неверов В.Н., Попов М.Р., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А.</i> Особенности магнитотранспорта двойной квантовой ямы HgTe/CdHgTe в параллельном магнитном поле .....	1081

## СПИСОК УЧАСТНИКОВ

**Anghel Dragos-Victor**

Faculty of Physics, University of Bucharest  
Str. Atomistilor, nr. 405, Magurele, 077125, Jud. Ilfov,  
Romania  
Roman+40746262943  
dragos@theory.nipne.ro

**Ivanov Iurii P.**

University of Cambridge  
27 Charles Babbage Road Cambridge CB3 0FS  
+441223767066  
ii243@cam.ac.uk

**Otsuji Taiichi**

Tohoku University  
2 Chome-1-1 Katahira, Aoba Ward, Sendai, Miyagi  
Prefecture 980-8577  
日本+81222176104  
otsuji@riec.tohoku.ac.jp

**Rabinovich Mikhail I.**

University of California  
9500 Gilman Drive #0328 La Jolla, CA  
+1858 336 2674  
mrabinovich@gmail.com

**Rodriguez Raul D.**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский поли-  
технический университет»  
ул. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия  
+79234322327  
raul@tpu.ru

**Vasilevskiy Mikhail Igorevich**

The University of Minho  
Largo do Paço, Braga, 4704-553, Portugal  
Portu+351916733075  
mikhail.vasilevskiy@inl.int

**Buzdin Alexander**

Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine  
Cours de la Libération, 351, Bordeaux, 33405, France  
+33540002502  
alexandre.bouzidine@u-bordeaux.fr

**Friedman Gennady**

Дрексельский университет  
3141 Chestnut Street, 12-816, Philadelphia, PA 19104,  
USA  
+1215-917-5378  
gf29@drexel.edu

**Klinovaja Jelena**

Университет Базеля  
Peterspl. 1, 4001 Basel, Швейцария  
+4161 207 36 56  
jelena.klinovaja@unibas.ch

**Silaev Mikhail**

Университет Тампере  
Kalevantie 4, 33100 Tampere, Финляндия  
89108761366  
silaev@kth.se

**Usanov Dmitrii Андреевич**

Paul Scherrer Institute  
Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland  
+78314623314  
usanov@phys.unn.ru

**Абделгани Маджед Абдельсалам Нашаат Мохаррам**

Объединённый институт ядерных исследований  
ул. Жолио-Кюри, 6 Дубна, Московская область,  
141980, Россия  
+79265837238  
majed@sci.cu.edu.eg

**Абрамкин Демид Суад**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики полупроводников  
им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской  
академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833306945  
dalamber.07@mail.ru

**Абросимова Наталья Дмитриевна**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79506027771  
andnenastik@inbox.ru

**Авдеев Максим Викторович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Ка-  
занский (Приволжский) федеральный университет»  
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия  
+78432337601  
avdeyev\_mv@mail.ru

**Авдиенко Павел Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+79819649837  
avdienko.pavel@gmail.com

**Аверина Наталья Игоревна**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79527655052  
nataliya.averina28@mail.ru

**Аверкиев Никита Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+79217940202  
averkiev@les.ioffe.ru

**Аверьянов Дмитрий Валерьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
пл. ак. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия  
+79153089770  
dm\_averyanov@mail.ru

**Акзянов Рамиль Шарифуллович**

Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н.Л. Духова  
ул. Суцневская, 22, Москва, 127055, Россия  
+79261416431  
apexgreen57@gmail.com

**Акишева Анна Владимировна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+71111111111  
annagudkova94@gmail.com

**Акмаев Марк Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326549  
akmaevma@lebedev.ru

**Аладышкин Алексей Юрьевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179485  
aladyshkin@ipmras.ru

**Алексеев Прохор Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
975699052597569  
prokher@gmail.com

**Алешкин Владимир Яковлевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
794828314179482  
aleshkin@ipmras.ru

**Аликин Юрий Михайлович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79193785349  
icreator666@gmail.com

**Аминев Денис Фагимович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991358005  
amdenis@yandex.ru

**Андреев Иван Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965228594  
andreev@issp.ac.ru

**Андреева Марина Алексеевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79168257595  
Mandreeva1@yandex.ru

**Андрианов Артем Ильич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79040576944  
artem.beyl@mail.ru

**Андряхина Елизавета Сергеевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
+79651380125  
andriyakhina.es@phystech.edu

**Андронов Александр Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314385185  
andron@ipmras.ru

**Андрюшечкин Борис Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук  
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия  
79037829627  
andrush@kapella.gpi.ru

**Аникиева Юлия Андреевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия  
+79115735619  
y.anikieva111@gmail.com

**Анисимов Андрей Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

+79522190100  
aan0100@gmail.com

**Антонов Дмитрий Александрович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия

+79202503324  
antonov@phys.unn.ru

**Антонова Ирина Вениаминовна**

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

пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79137312788  
antonova@isp.nsc.ru

**Антышева Галина**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79617485355  
sikretnoo@mail.ru

**Антюшин Евгений Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79991200207  
evgenyantushin@ipmras.ru

**Аплеснин Сергей Степанович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева» пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660014, Россия

+73912919028  
apl@iph.krasn.ru

**Арапкина Лариса Викторовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия

+74995038318  
arapkina@kapella.gpi.ru

**Арутюнов Константин Юрьевич**

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34  
+79296471123  
karutyunov@hse.ru

**Архипов Ростислав Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

+79119567068  
arkhipovrostislav@gmail.com

**Архипова Екатерина Александровна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
89103947900  
suroveginaka@ipmras.ru

**Архипова Елизавета Алексеевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

+79991675630  
elizaveta.arhip@yandex.ru

**Атепалихин Артемий Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия

+79229329898  
atepalikhin@hitech.cplire.ru

**Афоненко Александр Анатольевич**

Белорусский государственный университет пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Республика Беларусь

+375297050052  
a.afonenka@mail.ru

**Бабкин Серафим**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
+79258704905  
babkin.ss@phystech.edu



**Баева Эльмира Миталиповна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»  
ул. Малая Пироговская, 1, стр.1, Москва, 119991, Россия  
+79777478001  
baeva.elm@gmail.com

**Байдакова Наталия Алексеевна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
853068314385555  
banatale@ipmras.ru

**Байдусь Николай Владимирович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623190  
bnv@nifti.unn.ru

**Банников Михаил Игоревич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79154108962  
bannikovmi96@gmail.com

**Баранов Денис Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»  
141700 Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. д.9  
+79037714171  
denbaranv@rambler.ru

**Бастракова Марина Валерьевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79108926041  
mar.denisenko@gmail.com

**Бедин Сергей Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»  
ул. Малая Пироговская, 1, стр.1, Москва, 119991, Россия  
+7926262373925  
bserg5@gmail.com

**Бекин Николай Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский

центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179479  
nbekin@ipm.sci-nnov.ru

**Белов Александр Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»  
ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, 105005, Россия  
+79856183159  
alex.MT11@yandex.ru

**Белов Дмитрий Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79060349868  
dimsonbelov@yandex.ru

**Белоновский Алексей Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79119335538  
leha.s92.92@gmail.com

**Белых Василий Валерьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326362  
belykh@lebedev.ru

**Бельков Василий Валентинович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+7(812)2927989  
bel@epi.ioffe.ru

**Берковиц Владимир Леонидович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927317  
vladimir.berkovits@mail.ioffe.ru

**Беспалов Антон Андреевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский

центр Институт прикладной физики Российской академии наук  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79026886209  
bespalovaa@gmail.com

**Бибикова Вероника Валентиновна**

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»  
Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603950, ГСП-486, Россия  
+79087460445  
veronbib@mail.ru

**Бизяев Дмитрий Анатольевич**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул.Сибирский тракт, 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
+78432319107  
dbiziaev@inbox.ru

**Бобков Александр Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79057370021  
bobkov@issp.ac.ru

**Бобков Григорий Александрович**

Московский Физико-Технический институт (национальный исследовательский университет)  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.  
+79671054231  
gabobkov@mail.ru

**Бобкова Ирина Вячеславовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79031151926  
bobkova@issp.ac.ru

**Бобров Александр Игоревич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79200353537  
bobrov@phys.unn.ru

**Боженкина Анастасия Дмитриевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79056639397  
nnastasiaa@rambler.ru

**Божко Сергей Иванович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965228219  
bozhko@issp.ac.ru

**Большин Виталий Валериевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965228198  
bolg@mail.ru

**Бородин Богдан Романович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79522135508  
brborodin@gmail.com

**Бугаев Александр Викторович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
+79681858807  
bugaev.sasha99@mail.ru

**Бурдов Владимир Анатольевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623304  
burdov@phys.unn.ru

**Бурмистров Игорь Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики имени Л. Д. Ландау Российской академии наук  
пр. ак. Семенова, 1а, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79099884331  
burmi@itp.ac.ru

**Бурцев Антон Андреевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук  
ул. Святоозерская, 1, Шатура, 140700, Россия  
+79209152865  
murrkiss2009@yandex.ru

**Бухараев Анастас Ахметович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный ис-

следовательский центр «Казанский научный центр  
Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, Казань, 420029, Россия  
580298432319107  
a\_bukharaev@mail.ru

**Бушуев Владимир Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Мос-  
ковский государственный университет им. М.В. Ло-  
моносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74953967380  
vabushuev@yandex.ru

**Быков Виктор Александрович**

NT-MDT Spectrum Instruments  
Москва, Зеленоград, проезд №4922, дом 4, строе-  
ние 3  
+79852113544  
vbykov@ntmdt-si.com

**Вальков Валерий Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036,  
Россия  
+7391+79131834684  
vvv@iph.krasn.ru

**Васильев Денис**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Мос-  
ковский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана (национальный исследователь-  
ский университет)»  
ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, 105005, Россия  
+79168693059  
d.d.vasiliev@ya.ru

**Васильев Юрий Борисович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
090578122948290  
yu.vasilyev@mail.ioffe.ru

**Васин Кирилл Валерьевич**

The University of Augsburg  
Universitätsstraße, 2, Augsburg, 86159, Germany  
+79061116078  
vasin.kirill@uni-a.de

**Ведь Михаил Владиславович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Наци-  
ональный исследовательский Нижегородский госу-  
дарственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79101066998  
mikhail28ved@gmail.com

**Вековшинин Юрий Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт автоматизации и процессов

управления Дальневосточного отделения Россий-  
ской академии наук  
ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+79502823830  
vekovsh981@gmail.com

**Вилков Евгений Александрович**

Фрязинский филиал федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института радио-  
техники и электроники им. В.А. Котельникова Рос-  
сийской академии наук  
пл. Введенского 1, Фрязино, Московская обл.,  
141190, Россия  
79250376081  
e-vilkov@yandex.ru

**Вилков Илья Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт металлоорганической химии  
им. Г.А. Разуваева Российской академии наук  
ул. Тропинина, 49, ГСП-445, Нижний Новгород,  
603950, Россия  
+79200072012  
mr.vilkof@yandex.ru

**Винниченко Максим Яковлевич**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический универси-  
тет Петра Великого»  
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251,  
Россия  
+79214111694  
vinnimaks@mail.ru

**Вихрова Ольга Викторовна**

Научно-исследовательский физико-технический  
институт федерального государственного автоном-  
ного образовательного учреждения высшего обра-  
зования «Национальный исследовательский Ниже-  
городский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
306338314623120  
vikhrova@nifti.unn.ru

**Вишняков Евгений Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физический институт им. П.Н. Лебе-  
дева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991,  
Россия  
+79032886415  
juk301@mail.ru

**Власенко Владимир Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физический институт им. П.Н. Лебе-  
дева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991,  
Россия  
+7(499) 132-67-17  
vlasenkovlad@gmail.com

**Водзяновский Яромир**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук

ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79999784344  
vodzianovskii.iao@phystech.edu

**Водолазов Денис Юрьевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+783124179485  
vodolazov@ipmras.ru

**Вожаков Всеволод Андреевич**

Научно-исследовательский институт ядерной физи-  
ки им. Д. В. Скобельцына, Московский государ-  
ственный университет им. М.В. Ломоносова  
Ленинские горы, 1, стр. 2, ГСП-1, Москва, 119991,  
Россия  
+79160219511  
sevozh@yandex.ru

**Войцеховский Александр Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский госу-  
дарственный университет»  
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия  
+79131010077  
vav43@mail.tsu.ru

**Волков Владимир Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293394  
volkov.v.a@gmail.com

**Востоков Николай Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179492  
vostokov@ipm.sci-nnov.ru

**Высоцкий Сергей Львович**

Саратовский филиал федерального государствен-  
ного бюджетного учреждения науки Института ра-  
диотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+78452391236д.185  
vysotsl@gmail.com

**Вяткин Егор Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+79826324930  
egor.vyatkin@bk.ru

**Гавриленко Владимир Изяславович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
943938314179462  
gavr@ipmras.ru

**Галин Михаил Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179483  
galin@ipmras.ru

**Гапонов Сергей Викторович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179465  
svg@ipmras.ru

**Гапонова Дарья**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия, 88  
dmg@ipmras.ru

**Гарахин Сергей Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79036574182  
GarakhinS@yandex.ru

**Гареева Зухра Владимировна**

Институт физики молекул и кристаллов - обособ-  
ленное структурное подразделение Федерального  
государственного бюджетного научного учреждения  
Уфимского федерального исследовательского цен-  
тра Российской академии наук  
пр. Октября, 71, Уфа, 450075, Россия  
+79178049560  
zukhragzv@yandex.ru

**Геревенков Пётр Игоревич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+79817930351  
petr.gerevenkov@yandex.ru

**Гимадеева Любовь Вячеславовна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79527366033  
lyubov.gimadeeva@mail.ru

**Гимазов Ильнур Илхамович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской Академии наук  
ул. Сибирский тракт, 10/7, Казань, Республика Татарстан, 420029, Россия  
+79375821074  
ubvfr94@mail.ru

**Гиппиус Николай Алексеевич**

Сколковский институт науки и технологий  
Территория Инновационного Центра «Сколково»,  
улица Нобеля, д. 3 Москва 143026 Россия  
+74952801481  
n.gippius@skoltech.ru

**Гиршова Елизавета Ильинична**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79215804634  
ilinishna@gmail.com

**Глазов Михаил Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79119130436  
glazov@coherent.ioffe.ru

**Глазов Сергей Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный социально-педагогический университет»  
пр. им. В.И. Ленина, 27, Волгоград, Волгоградская обл., 400005  
+78442602813  
ser-glazov@yandex.ru

**Голеницкий Кирилл Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+796024665428  
golenitski.k@mail.ioffe.ru

**Голикова Татьяна Евгеньевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79164467524  
golt2@list.ru

**Головатенко Александр Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79046361480  
sasha.pti@mail.ioffe.ru

**Голубев Олег Лазаревич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927948  
O.Golubev@mail.ioffe.ru

**Гольцман Григорий Наумович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»  
ул. Малая Пироговская, 1, стр.1, Москва, 119991, Россия  
+74992461202  
goltsman10@mail.ru

**Гончаров Борис Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
пл. ак. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия  
+79850264999  
goncharov\_bv@nrcki.ru

**Горай Леонид Иванович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
971338129097133  
lig@pcgrate.com

**Горан Карапетров**

Дрексельский университет  
3141 Chestnut Street, 12-816, Philadelphia, PA 19104, USA  
+16308545231  
goran@drexel.edu

**Горбачев Алексей Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук  
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314164960  
gorb@appl.sci-nnov.ru

**Гордеева Анастасия Борисовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927317  
anastasiya.gordeeva@mail.ioffe.ru

**Горев Роман Валерьевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179488  
gorevrv@ipmras.ru

**Горнаков Владимир Степанович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79035038677  
gornakov@issp.ac.ru

**Горюнов Юрий Владимирович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, Казань, 420029, Россия  
+79063242079  
gorjunov@kfti.knc.ru

**Грачев Андрей Андреевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79878079458  
stig133@gmail.com

**Грибакин Борис**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
+79119963181  
bgribakin@gmail.com

**Грибко Владимир Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79092926273  
gribkovladimir@icloud.com

**Григорьев Павел Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук  
пр. ак. Семенова, 1а, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79264140139  
grigorev@itp.ac.ru

**Гринберг Яков Семенович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»  
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630092, Россия  
+79139357613  
yakovgreenberg@yahoo.com

**Гринвальд Иосиф Исаевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
ул. Минина, 24, ГСП-41, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79519112166  
grinwald@mts-nn.ru

**Гришин Максим Вячеславович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук  
ул. Косыгина, 4, Москва, 119991, Россия  
+74991376130  
mvgrishin68@yandex.ru

**Громыко Дмитрий Алексеевич**

Сколковский институт науки и технологий  
Территория Инновационного Центра «Сколково», улица Нобеля, д. 3 Москва 143026 Россия  
+79067804712  
Dmitrii.Gromyko@skoltech.ru

**Грузнев Димитрий Вячеславович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук  
ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+74232310696  
gruznev@iacp.dvo.ru

**Грязнева Татьяна Алексеевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79154761537  
gryazneva@ckp-miet.ru

**Губанов Владислав Андреевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79603562742  
vladmeen@gmail.com

**Губанова Юлия Андреевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»



ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79878252984  
yulya29022095@gmail.com

**Гудина Светлана Викторовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+73433783788  
svropova@imp.uran.ru

**Гультиков Никита Владимирович**

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»  
ул. Введенского, 3, Москва, 117342, Россия  
+79671508197  
nikita.gultickov@yandex.ru

**Гуляев Дмитрий Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833304475  
gulyaev@isp.nsc.ru

**Гусев Евгений Эдуардович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79169098910  
bubbledouble@mail.ru

**Гусев Никита Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179488  
gusevns@ipmras.ru

**Гусев Сергей Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179489+122  
gusev@ipmras.ru

**Гусева Валерия Евгеньевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
18804+79991218804  
vamnell.7g@mail.ru

**Гусихин Павел**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79162471812  
gusikhin@issp.ac.ru

**Гущина Екатерина Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927317  
katgushch@yandex.ru

**Данилов Юрий Александрович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623120  
danilov@nifti.unn.ru

**Дворецкий Сергей Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833304967  
dvor@isp.nsc.ru

**Девятериков Денис Игоревич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+79221216041  
devidor@yandex.ru

**Девятков Эдуард Валентинович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79160419538  
dev@issp.ac.ru

**Дегоев Максим Максимович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79218865955  
degoev98@mail.ru

**Дедкова Анна Александровна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79636047182  
dedkova@ckp-miet.ru

**Дементьев Петр Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79045526926  
demenp@yandex.ru

**Демидов Евгений Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79047888762  
demidov@phys.unn.ru

**Демин Глеб Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ» проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79031422589  
gddemin@gmail.com

**Демишев Сергей Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия  
+74995038704  
demis@it.gpi.ru

**Денисова Елена Александровна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036, Россия  
+73912494556  
len-den@iph.krasn.ru

**Дивин Юрий Яковлевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79035956077  
yyd@cplire.ru

**Дикарева Наталья Васильевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623190  
dnat@ro.ru

**Дмитриев Дмитрий Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79139287299  
ddmitriev@isp.nsc.ru

**Долгов Александр Константинович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук Нагорный проезд, 7, корп. 8/0, Москва, 117105, Россия  
+79998697749  
sereega.retorov@yandex.ru

**Долуденко Илья Михайлович**

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук Ленинский пр., 59, Москва, 119333, Россия  
+79688639633  
doludenko.i@yandex.ru

**Дорохин Михаил Владимирович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623120  
dorokhin@nifti.unn.ru

**Дровосеков Алексей Борисович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук ул. Косыгина, 2, Москва, 119334, Россия  
+74991376820  
drovosekov@kapitza.ras.ru

**Дрязгов Михаил Александрович**

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» Таллинская, д.34, Москва, 123458, Россия  
032189123032168  
mdryazgov@hse.ru

**Дубинин Иван Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79040382093  
Vanya.Dubinin.99@yandex.ru

**Дубинов Александр Алексеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7(831)417-94-82+234  
sanya@ipmras.ru

**Дунаевский Михаил Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+78122927317  
Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

**Дуров Кирилл Вячеславович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
38784+79536938784  
zevs2801@mail.ru

**Дьяков Сергей Александрович**

Сколковский институт науки и технологий  
Территория Инновационного Центра «Сколково»,  
улица Нобеля, д. 3 Москва 143026 Россия  
+79265674423  
s.dyakov@skoltech.ru

**Дюделев Владислав Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+79218566889  
v.dudelev@mail.ru

**Дёмина Полина Борисовна**

Научно-исследовательский физико-технический  
институт федерального государственного автоном-  
ного образовательного учреждения высшего обра-  
зования «Национальный исследовательский Ниже-  
городский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
678799063678791  
demina@phys.unn.ru

**Европейцев Евгений Андреевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+79650820981  
john\_fzf@mail.ru

**Евсеев Сергей Сергеевич**

Московский Физико-Технический институт (нацио-  
нальный исследовательский университет)  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Ин-  
ститутский пер., 9  
+79613401262  
evseev.1999@yandex.ru

**Евсиков Илья Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79166650677  
evsikov.ilija@yandex.ru

**Ежевский Александр Александрович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79107913006  
ezhevski@phys.unn.ru

**Екомасов Евгений Григорьевич**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Баш-  
кирский государственный университет»  
ул. Фрунзе, 32, Уфа, 450007, Россия  
+79173462278  
EkomasovEG@gmail.com

**Еналдиев Владимир Викторович**

Университет Ланкастера  
Bailrigg, Lancaster LA1 4YW, UK  
+444956293394  
vova.enaldiev@gmail.com

**Еремеев Сергей Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский госу-  
дарственный университет»  
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия  
+79528852940  
eremeev@ispms.tsc.ru

**Еремин Илья Михайлович**

Рурский университет в Бохуме  
44801, Бохум, Университетштрассе, 150  
+49156529876  
ieremin@yandex.ru  
Еремин Михаил Васильевич  
Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Ка-  
занский (Приволжский) федеральный университет»  
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия  
+78432315116  
meremin@kpfu.ru

**Ершов Алексей Валентинович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623306  
ershov@phys.unn.ru

**Ефремова Светлана Леонидовна**

Федеральное государственное унитарное предпри-  
ятие Всероссийский научно-исследовательский  
институт автоматики им. Н. Л. Духова  
ул. Суцневская, 22, Москва, 127055, Россия  
+79636494467  
svetlana.efr96@gmail.com

**Жакетов Владимир Дмитриевич**

Объединённый институт ядерных исследований  
ул. Жолио-Кюри, 6 Дубна, Московская область,  
141980, Россия  
+79636145019+74962162875  
zhaketov@nf.jinr.ru

**Жаров Александр Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314385037  
zharov@ipmras.ru

**Желтиков Владимир**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Мос-  
ковский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовате-  
льский университет)»  
ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, 105005, Россия  
+79776762477  
zheltikov.vladimir@yandex.ru

**Жидяев Кирилл Сергеевич**

Научно-исследовательский физико-технический  
институт федерального государственного автоном-  
ного образовательного учреждения высшего обра-  
зования «Национальный исследовательский Ниже-  
городский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79524443405  
zhidyaev@nifti.unn.ru

**Жмерик Валентин Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021,  
Россия  
+78122927124  
jmerik@pls.ioffe.ru

**Жолудев Максим Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7(831) 417-94-82 +262  
zholudev@ipmras.ru

**Жукавин Роман Хусейнович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179479  
zhur@ipmras.ru

**Жуков Алексей Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики твердого тела Рос-  
сийской академии наук  
ул. ак. Осипяна, 2, Черноголовка, Московская  
обл., 142432, Россия  
+74965228341  
azhukov@issp.ac.ru

**Жуков Андрей Олегович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79601831304  
zhukov967@gmail.com

**Жуков Николай Дмитриевич**

Общество с ограниченной ответственностью «НПП  
Волга»  
ул. Вавилова, 13, кв. 54  
+79603595735  
ndzhukov@rambler.ru

**Журавлев Михаил Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург,  
199034, Россия  
+79117032266  
myezhur@gmail.com

**Забавичев Илья Юрьевич**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623265  
zabavichev.rf@gmail.com

**Заболотных Андрей Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293394  
zabolotnyh\_andre@mail.ru

**Заворницын Роман Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики металлов имени  
М.Н. Михеева Уральского отделения Российской  
академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+79126881380  
zavornitsyn@imp.uran.ru

**Загороднев Игорь Витальевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79175563494  
igor.zagorodnev@gmail.com

**Загорский Дмитрий Львович**

Федеральное государственное учреждение «Феде-  
ральный научно-исследовательский центр «Кристал-  
лография и фотоника» Российской академии наук  
Ленинский пр., 59, Москва, 119333, Россия  
+74991350510  
dzagorskiy@gmail.com

**Зазымкина Дарья Александровна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79057261002  
zazymkina\_darya@mail.ru

**Зайцев-Зотов Сергей Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+7495 629 34 47  
serzz@cplire.ru

**Заморянская Мария Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79219171582  
zamor.mv@gmail.com

**Захаров Всеволод Евгеньевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79524542290  
rachitelnicc@mail.ru

**Захожев Константин Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79132354898  
k.zakhozhev@g.nsu.ru

**Здоровейщев Антон Владимирович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79108986824  
zdrovevi@gmail.com

**Здоровейщев Даниил Антонович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79159311720  
daniel.zdorov@gmail.com

**Зиновьев Владимир Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников

им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+7(383)333-25-19  
zinoviev19@mail.ru

**Злотников Антон Олегович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036, Россия  
+7(391)243-07-63  
zlotn@iph.krasn.ru

**Зорина Мария Владимировна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79814179476  
mzor@ipmras.ru

**Зотов Андрей Вадимович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук  
ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+74232310412  
zotov@iacp.dvo.ru

**Зубанов Иван Андреевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79107926863  
zrehbknhfde99@gmail.com

**Иванов Алексей Сергеевич**

АО Научно-производственное предприятие «Салют»  
603950 г. Нижний Новгород ул. Ларина, д.7  
+79043905885  
ivanov.2582@yandex.ru

**Иванов Николай Аркадьевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»  
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия  
+73952-405903  
ivnik@istu.edu

**Иго Александр Владимирович**

Ульяновский государственный университет  
432970, Российская Федерация, г. Ульяновск, улица Льва Толстого, дом 42  
+79061434690  
igoalexander@mail.ru

**Иконников Антон Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мос-

ковский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74959391151  
antikon@physics.msu.ru

**Ильин Александр Иванович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук  
ул. Институтская 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79853118088  
alivil2017@yandex.ru

**Ильин Никита Валерьевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»  
ул. Суханова, 8, Владивосток, 690950, Россия  
+79644343798  
ilii\_nva@dvfu.ru

**Ильина Марина Владимировна**

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета  
ул. Шевченко, 2Е, Таганрог, 347922, Россия  
+78634371611  
mailina@sfedu.ru

**Ионин Александр Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79264525943  
sasha-ionin@mail.ru

**Ичкитидзе Леван Павлович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+7+79150818258  
ichkitidze@bms.zone

**Ищенко Денис Вячеславович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833308888  
miracle4348@gmail.com

**Кавеев Андрей Камильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122976411  
kaveev@mail.ioffe.ru

**Кавокин Алексей Витальевич**

Российский квантовый центр

ул. Новая, 100, БЦ «Урал», дер. Сколково, Московская обл., Россия  
475329118328276  
a.kavokin@soton.ac.uk

**Каган Мирон Соломонович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293361  
kagan@cplire.ru

**Казанов Дмитрий Робертович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79213035613  
kazanovdr@gmail.com

**Калашникова Александра Михайловна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79213221286  
kalashnikova@mail.ioffe.ru

**Калентьева Ирина Леонидовна**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79202920787  
istery@rambler.ru

**Калинников Михаил Анатольевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79524468006  
kalinnikov@ipmras.ru

**Калитеевский Михаил Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфеева Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79219472324  
m.kaliteevski@mail.ru

**Камашев Андрей Андреевич**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный ис-



следовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул.Сибирский тракт, 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
+79053100999  
kamandi@mail.ru

**Камелин Дмитрий Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179494 +213  
kent@ipmras.ru

**Камзин Александр С.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79219666616  
kasklen@gmail.com

**Камзин Александр Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79219666616  
ASKam@mail.ioffe.ru

**Каратаев Андрей Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
+79131392547  
farif123@mail.ru

**Караштин Евгений Анатольевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179488  
eugenk@ipmras.ru

**Карпов Андрей**

Физико-математический институт, Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»  
ул. Коммунистическая, 24, Сыктывкар, 167982, Россия  
+79068811993  
karpov@ipm.komisc.ru

**Качоровский Валентин Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79219941081  
kachor.valentin@gmail.com

**Кибис Олег Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»  
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630092, Россия  
79139440647  
oleg.kibis@nstu.ru

**Ким Павел Павлович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»  
Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1  
+74997206907  
KimP@ckp-miet.ru

**Кислинский Юлий Вячеславович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+7495 626 74 31  
yulii@hitech.cplire.ru

**Кленов Николай Викторович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74959392588  
nvklenov@gmail.com

**Климов Александр Эдуардович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79139578602  
aek56@mail.ru

**Клоков Андрей Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326545  
klokov@sci.lebedev.ru

**Клочков Алексей Николаевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия  
+79168695256  
klochkov\_alexey@mail.ru

**Ковалдов Дмитрий Алексеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
57416+79867457416  
matrixnn2@gmail.com

**Ковалев Вадим**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
33264(383) 333-32-64  
vmk111@yandex.ru

**Ковалевский Константин Андреевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179479  
atan4@yandex.ru

**Козабаранов Роман Васильевич**

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
пр. Мира, 37, Саров, 607188, Россия  
+79101497706  
roman.kozabaranov@yandex.ru

**Козлов Дмитрий Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314384045  
dvkoz@ipmras.ru

**Козлов Никита Васильевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79221749068  
nkzfc3@gmail.com

**Колбатова Анна Игоревна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»  
ул. Малая Пироговская, 1, стр.1, Москва, 119991, Россия  
+79851912581  
akardakova@hse.ru

**Колесников Алексей Олегович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79647996300  
alexey6180@gmail.com

**Колосовский Данил Антонович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников

им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79319545584  
d.kolosovsky@isp.nsc.ru

**Кольчевский Николай Николаевич**

Белорусский государственный университет  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Республика Беларусь  
+375297745553  
kolchevsky@gmail.com

**Коляда Дмитрий Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»  
ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия  
+79523821501  
kolyada.dima94@mail.ru

**Комогорцев Сергей Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036, Россия  
+79607659567  
komogor@iph.krasn.ru

**Конаков Антон Алексеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
79103910467  
konakov\_anton@mail.ru

**Константинян Карен Иванович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956297431  
karen@hitech.cplire.ru

**Копасов Александр Андреевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79877410867  
kopasov@ipmras.ru

**Корнилов Виктор Михайлович**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы»  
ул. Октябрьской революции, 3а, Уфа, 450000, Россия  
+79610391952  
vict.korniloff2015@yandex.ru

**Королев Дмитрий Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79202527352  
dmkoroлев@phys.unn.ru

**Короткова Мария Геннадьевна**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79506160175  
mgk-00@yandex.ru

**Коротнева Александра Романовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79137574239  
mao101118@gmail.com

**Коршунов Максим Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036, Россия  
+79080119774  
mkor@iph.krasn.ru

**Коряжкина Мария Николаевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79101284987  
mahavenok@mail.ru

**Котова Любовь Викторовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+7(812) 297-2245  
kotova@mail.ioffe.ru

**Кочаровская Екатерина Рудольфовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7831-4160669  
catrings@gmail.com

**Кочаровский Владимир Владиленович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук

ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314164894  
kochar@appl.sci-nnov.ru

**Кошелев Василий Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ» проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79167432493  
90znh06@gmail.com

**Красильник Захарий Фишелевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7(831) 417-94-74  
krasilnik@list.ru

**Красильников Анатолий Витальевич**

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» пл. ак. Курчатова, 1, стр. 3, Москва, 123182, Россия  
+74992817222  
A.Krasilnikov@iterf.ru

**Красильникова Людмила**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7(831) 417-94-82  
luda@ipmras.ru

**Краснов Владимир Михайлович**

Физический Департамент Fysikum, AlbaNova University Center, SE-10691 Stockholm, Sweden  
+4655378606  
vladimir.krasnov@fysik.su.se

**Криштоп Владимир Григорьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук ул. Институтская 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965244016  
vgkvgk@mail.ru

**Крюков Руслан Николаевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79308154612  
kriukov.ruslan@yandex.ru

**Кудасов Юрий Бориславович**

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
пр. Мира, 37, Саров, 607188, Россия  
+78313027239  
yu\_kudasov@yahoo.com

**Кудрин Алексей Владимирович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79307153154  
alex2983@yandex.ru

**Кудрявцев Константин**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314385037  
konstantin@ipmras.ru

**Кудряшов Андрей Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»  
ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
+79110274598  
Kudriashov.av@phystech.edu

**Кузикова Анна Васильевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79819623310  
anna.kuzikova@yandex.ru

**Кузин Сергей Вадимович**

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук  
Ленинский пр., 59, Москва, 119333, Россия  
+79167950693  
s.kuzin@lebedev.ru

**Кузнецов Юрий Михайлович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79108704144  
yurakz94@list.ru

**Кузнецова Ирина Александровна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова  
ул. Советская, 14, Ярославль, 150000, Россия  
+79109710399  
kuz@uniyar.ac.ru

**Кузнецова Мария Сергеевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
+79215581876  
mashakuznecova@bk.ru

**Кузьмин Леонид Сергеевич**

Chalmers University of Technology  
Gothenburg, SE-412 96, Sweden  
+469055411291  
kuzmin@chalmers.se

**Кузьмин Михаил Валерьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927148  
m.kuzmin@mail.ioffe.ru

**Кузьмичев Светослав Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+7(906)076-33-13  
kuzmichev@mig.phys.msu.ru

**Кузьмичева Татьяна Евгеньевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79031731649  
kuzmichevate@lebedev.ru

**Кукушкин Владимир Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук  
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79535590466  
vakuk@ipfran.ru

**Кукушкин Сергей Арсеньевич**

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук  
Васильевский остров, Большой проспект, 61, Санкт-Петербург, 199178, Россия  
+79112621702  
sergey.a.kukushkin@gmail.com

**Кулаковский Владимир Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965222691  
kulakovskulakovs@mail.ru

**Кулебякина Евгения Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
173248-499-132-63-65  
kulebyakinaev@lebedev.ru

**Куликов Кирилл Вячеславович**

Объединённый институт ядерных исследований  
ул. Жолио-Кюри, 6 Дубна, Московская область, 141980, Россия  
+79652395265  
kulikov@theor.jinr.ru

**Куликова Дарья**

Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова  
ул. Суцневская, 22, Москва, 127055, Россия  
+79266082952  
dp.kulikova@yandex.ru

**Кумар Ниранджан**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79290418062  
kumar@ipmras.ru

**Кункель Татьяна Сергеевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79778109395  
tatyana\_kunkel@mail.ru

**Кунту Дарья Вадимовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79111636361  
dariya.kuntu@mail.ioffe.ru

**Кунцевич Александр Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326822  
kuntsevich.alexander@gmail.com

**Кунькова Зоя Эдуардовна**

Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
пл. Введенского 1, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия  
+74965652469  
zek@ms.ire.rssi.ru

**Курдюбов Андрей**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 190034, Россия  
+79112723350  
kurdyubov@yandex.ru

**Курин Владислав Викторович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179483  
kurin@ipmras.ru

**Лебедев Александр Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927125  
shura.lebe@mail.ioffe.ru

**Лебедев Денис Владимирович**

Институт аналитического приборостроения  
Рижский пр., 26, Санкт-Петербург, 190103  
+79315300733  
denis.v.lebedev@gmail.com

**Лебедев Михаил Вячеславович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122927344  
mleb@triat.ioffe.ru

**Лебединская Анастасия Евгеньевна**

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»  
Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603950, ГСП-486, Россия  
+79202563006  
anastasia\_le@mail.ru

**Лелекова Анастасия Федоровна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

ул. Горького, 87, Владимир, 600000, Россия  
+79964428776  
lelekowa.a@yandex.ru

**Литвяк Валентина Михайловна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
+79523945719  
valiok.ok@gmail.com

**Лихачев Кирилл Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79992329085  
kirill.likhachev@metalab.ifmo.ru

**Лобанов Дмитрий Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179465  
dima@ipmras.ru

**Логинов Артем**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79161497066  
temalog97@gmail.com

**Логинов Борис Альбертович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79853646093  
b-loginov@mail.ru

**Лозовой Кирилл Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия  
+73822413517  
lka@sibmail.com

**Лопатин Алексей Яковлевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314385313  
lopatin@ipm.sci-nnov.ru

**Лубенченко Александр Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ»  
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия.  
+79055410495  
LubenchenkoAV@mpei.ru

**Лучин Валерий Иванович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79047842714  
luchin@ipmras.ru

**Лысов Михаил Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79122345050  
mikhail.lysov@urfu.ru

**Мазаник Андрей Аркадьевич**

Объединённый институт ядерных исследований  
ул. Жолио-Кюри, 6 Дубна, Московская область, 141980, Россия  
+79199627354  
mazanik@theor.jinr.ru

**Мазов Лев Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+72580398  
mazov@ipmras.ru

**Майдэбура Ян Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79612269666  
hnxr5@gmail.com

**Максимов Андрей Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79055081866  
maksimov@issp.ac.ru

**Малышев Илья Вячеславович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»



ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79026815538  
ilya-malyshev@ipmras.ru

**Мальшева Ирина Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79099148717  
malysheva.iv@shg.ru

**Мамин Ринат Файзрахманович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, Казань, 420029, Россия  
+78432721254  
rf\_mamin@yahoo.com

**Мансуров Владимир Геннадьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833306945  
vgmans63@gmail.com

**Мармалюк Александр Анатольевич**

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»  
ул. Введенского, 3, Москва, 117342, Россия  
+74953333325  
almarm@mail.ru

**Мартышкин Александр Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79873791538  
aamartyshkin@gmail.com

**Марычев Павел Михайлович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79302880122  
observermp@yandex.ru

**Маслов Дмитрий Андреевич**

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
пр. Мира, 37, Саров, 607188, Россия  
+78313027146  
maslov\_dem@mail.ru

**Мастеров Дмитрий Вячеславович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79202587000  
masterov@ipmras.ru

**Матецкий Андрей Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук  
ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+79024865035  
mateckij@iacp.dvo.ru

**Матрозова Екатерина Андреевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
ул. Минина, 24, ГСП-41, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79306706751  
ematroзова@gmail.com

**Махмудиан Мехррад Махмудович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск-90, 630090, Россия  
+79130092799  
m.makhmudian1@g.nsu.ru

**Махов Иван Сергеевич**

Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“»  
190008, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, д. 16  
+79817487894  
makhoviv@gmail.com

**Мельников Александр Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79103929860  
melnikov@ipm.sci-nnov.ru

**Мельников Григорий Юрьевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
464969638546496  
grisha2207@list.ru

**Меренков Алексей Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Ленинский пр., 4, Москва, 119991, Россия  
+79168568953  
merenkov.alexey92@gmail.com

**Мехоношин Дмитрий Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79826171554  
dmitry.mehonoshin@urfu.ru

**Милахин Денис Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+7923-143-7037  
dmilakhin@isp.nsc.ru

**Миляев Михаил Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+73433783881  
milyaev@imp.uran.ru

**Милёхин Александр Германович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
082043833308204  
milekhin@isp.nsc.ru

**Миньков Григорий Максимович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+79226015461  
grigori.minkov@imp.uran.ru

**Миргазизова Екатерина Фануровна**

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
123458, Москва, ул. Таллинская, д.34  
+79831379873  
emirgazizova@inbox.ru

**Мионов Виктор Леонидович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79030601267  
mironov@ipmras.ru

**Мионов Сергей Викторович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79519142322  
sermironov@rambler.ru

**Михайленко Михаил Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79990727677  
mikhaylenko@ipmras.ru

**Михайлов Андрей Валерьевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 190034, Россия  
+78124284546  
mikhailovav@yandex.ru

**Михайлов Владислав Михайлович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»  
ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
+79776114896  
Mikhailov.vm@phystech.edu

**Михайлов Николай Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833304967  
mikhailov@isp.nsc.ru

**Михайлова Татьяна Владиславовна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»  
295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4  
+79787438395  
tatvladismikh@cfuv.ru

**Михайловский Ростислав Викторович**

Университет Ланкастера  
Bailrigg, Lancaster LA1 4YW, UK  
+449103814924  
r.mikhaylovskiy@lancaster.ac.uk

**Михалюк Алексей Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+79146580032  
mih-alexey@yandex.ru

**Михеенков Андрей Витальевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук Калужское шоссе, стр. 14, Троицк, 142190, Россия  
+79060335332  
mikheen@bk.ru

**Мишин Алексей Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук  
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79535749948  
mishin.nn@mail.ru

**Мишина Елена Дмитриевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»  
пр. Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия  
+79165506239  
mishina\_elena57@mail.ru

**Могунов Ярослав Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79213388056  
mogunov@mail.ioffe.ru

**Моисеев Константин**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+78122977929  
mkd@iropt2.ioffe.ru

**Моисеенко Илья Михайлович**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+78452511179  
quikc@yandex.ru

**Морозов Константин Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79522764414  
morzconst@gmail.com

**Морозов Михаил Юрьевич**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ра-

диотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+78452511179  
mikkym@mail.ru

**Морозов Сергей Вячеславович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79056625685  
more@ipmras.ru

**Морозова Анна Сергеевна**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
+79376172526  
morozova\_anna\_s@mail.ru

**Москвин Александр Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+73432694431  
alexander.moskvin@urfu.ru

**Мотова Елена Сергеевна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79103874714  
es@ipmras.ru

**Мохов Дмитрий**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79052660803  
dm\_mokhov@rambler.ru

**Мумляков Александр Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук  
119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 32а  
+79251829290  
irbit\_oppozit@mail.ru

**Мурагиджимана Теонесте**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Са-

марский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева»  
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия  
+79032202513  
tmuragijimana@yahoo.fr

**Мурзина Татьяна Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74959393669  
murzina@mail.ru

**Мухаматчин Камиль Рафаилович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+711111111  
mykamil@yandex.ru

**Муханова Екатерина Дмитриевна**

Сколковский институт науки и технологий  
Территория Инновационного Центра «Сколково»,  
улица Нобеля, д. 3 Москва 143026 Россия  
+711111111  
mukhanova.ed@phystech.ru

**Набиуллин Ильдар**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия  
+79125969136  
nabildar@yandex.ru

**Нагаев Кирилл Эдуардович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293435  
nag@cplire.ru

**Настовьяк Алла Георгиевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833331475  
alla@isp.nsc.ru

**Нежданов Алексей Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79200240282  
nezhdanov@phys.unn.ru

**Некпелов Сергей Вячеславович**

Физико-математический институт, Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

ул. Коммунистическая, 24, Сыктывкар, 167982, Россия  
+78212391451  
NekipelovSV@mail.ru

**Некоркин Сергей Михайлович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79026815223  
nekorkin@nifti.unn.ru

**Некрасов Игорь Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук  
ул. Амундсена, 106, Екатеринбург, 620016, Россия  
+79122451427  
nekrasov@iep.uran.ru

**Нечай Андрей Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+74561666  
nechay@ipm.sci-nnov.ru

**Никируй Кристина Эрнестовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
пл. ак. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия  
+79031286073  
NikiruyKristina@gmail.com

**Никитин Максим Валерьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79261859634  
nikitin@cplire.ru

**Никитов Сергей Аполлонович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293387  
nikitov@cplire.ru

**Никитченко Андрей Игоревич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79112373123  
nikitchenko@mail.ioffe.ru

**Николаев Сергей Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991,  
Россия  
+74991326448  
nikolaev-s@yandex.ru

**Николенко Антон Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. ак. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия  
+7(383) 329-43-47  
A.D.Nikolenko@inp.nsk.su

**Никонов Сергей Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79998048965  
nikonow2014@gmail.com

**Никулин Юрий Васильевич**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+79603580392  
yvnikulin@gmail.com

**Никулов Алексей Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук  
ул. Институтская 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79851534179  
nikulovalexey@gmail.com

**Новиков Алексей Витальевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179480  
anov@ipmras.ru

**Новиков Павел Леонидович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833332519  
novikov@isp.nsc.ru

**Носач Евгений Владимирович**

Московский Физико-Технический институт (национальный исследовательский университет)  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.  
+79154508132  
evgeny.nosach@phystech.edu

**Носкова Дарья Дмитриевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79660356502  
dasha.noskova.1998@mail.ru

**Нургазизов Нияз Ильгизович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
+78432319107  
niazn@mail.ru

**Нурмухаметов Алексей Русланович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия  
+79050224405  
srgalex@list.ru

**Оболенский Сергей Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79524721946  
obolensk@rf.unn.ru

**Овчаренко Сергей Вадимович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»  
пр. Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия  
+79168617300  
serg30101993@gmail.com

**Овчинников Александр Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
020749630502074  
alexander.ovchinnikov@urfu.ru

**Овчинников Сергей Геннадьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036, Россия  
+73912432906  
sgo@iph.krasn.ru

**Оганнисян Размик Ашотович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический ин-

ститут (национальный исследовательский университет)»  
ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
+79163484282  
gazo96@yandex.ru

**Одинцов Сергей Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79379372633867  
odinoff@gmail.com

**Окомельков Александр Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия, 88  
okom@ipmras.ru

**Окулич Евгения**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79307060757  
eokulich@nifti.unn.ru

**Оладышкин Иван Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук  
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79200289787  
oladyshkin@gmail.com

**Орлов Виталий Александрович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»  
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия  
+79039233717  
vaorlov@sfu-kras.ru

**Орлова Екатерина Евгеньевна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79063563919  
orlova@ipmras.ru

**Орлова Ксения Николаевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия  
+79502775499  
budarina\_na2013@mail.ru

**Орлова Надежда Николаевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
229469629480627  
honna@issp.ac.ru

**Осин Александр Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук  
пр. ак. Семенова, 1а, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79162858442  
sashka\_osin@mail.ru

**Осинных Игорь Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+7(383)330-44-75  
igor-osinnykh@isp.nsc.ru

**Осотова Ольга Игоревна**

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета  
ул. Шевченко, 2Е, Таганрог, 347922, Россия  
+79281288976  
osotova@sfedu.ru

**Охапкин Андрей Игоревич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179450  
andy-ohapkin@yandex.ru

**Павлов Виктор Георгиевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79112546340  
vpavlov@ms.ioffe.ru

**Павлова Татьяна Витальевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук  
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия  
+79169109810  
tania.v.pavlova@gmail.com

**Памятных Сергей Евгеньевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79221697625  
pamyatnykh.sergey@urfu.ru



**Панкратов Андрей Леонидович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79051913223  
alp@ipmras.ru

**Папроцкий Станислав Константинович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79165457597  
s.paprotskiy@gmail.com

**Парафин Алексей Евгеньевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
115228314179493  
parafin@ipmras.ru

**Патрин Геннадий Семенович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Си-  
бирский федеральный университет»  
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия  
+73912912967  
patrin@iph.krasn.ru

**Пашенькин Игорь Юрьевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179488  
pashenkin@ipmras.ru

**Пашин Дмитрий Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79506150773  
pashindmi@gmail.com

**Пашкин Юрий Александрович**

Университет Ланкастера  
Bailrigg, Lancaster LA1 4YW, UK  
+441524593268  
y.pashkin@lancaster.ac.uk

**Перекалов Александр Алексеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79159311007  
alexander.152rus@yandex.ru

**Перетокин Артем Викторович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79040500182  
aperetokin@ipmras.ru

**Пермякова Ольга Олеговна**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего профессионального  
образования «Московский физико-технический ин-  
ститут (национальный исследовательский универ-  
ситет)»  
ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
+79504411477  
o.permyakova@phystech.edu

**Перов Анатолий Александрович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79202992054  
wkb@inbox.ru

**Пестов Алексей Евгеньевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179476  
aepestov@ipm.sci-nnov.ru

**Пестов Евгений Евгеньевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179485  
pestov@ipmras.ru

**Петров Илья Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский поли-  
технический университет»  
ул. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия  
+79528046872  
iliaserpetrov@gmail.com

**Петров Станислав Игоревич**

Закрытое акционерное общество «Научное и техно-  
логическое оборудование»  
пр. Энгельса, 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия  
+78123135451  
petrov@semiteq.ru

**Петров Юрий Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург,  
199034, Россия  
+78124284733  
y.petrov@spbu.ru

**Пещеренко Николай Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук пр. ак. Семенова, 1а, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79857567966  
peshcherenko@itp.ac.ru

**Писарев Роман Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+7905-273-2472  
pisarev@mail.ioffe.ru

**Пихтин Никита Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79213033739  
nike@hpld.ioffe.ru

**Пластовец Вадим**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79616338411  
plastovec26@gmail.com

**Платонов Данил Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, 105005, Россия  
+79161162327  
danillplaton0ff@yandex.ru

**Плешков Роман Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79108789261  
pleshkov@ipmras.ru

**Подгаецкий Константин Андреевич**

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» ул. Введенского, 3, Москва, 117342, Россия  
14275+79858714275  
podgaetskykonstantin@yandex.ru

**Покровский Вадим Ярославович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293459  
vadim.pokrovskiy@mail.ru

**Полевой Константин Борисович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» 141700 Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. д.9  
+79017003542  
polevoy.kb@phystech.edu

**Ползикова Наталья Ивановна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956293412  
polz@cplire.ru

**Полищук Ольга Витальевна**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
812198452511179  
polischuk.sfire@mail.ru

**Полковников Владимир Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79030601487  
polkovnikov@ipmras.ru

**Половинкин Андрей Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7 831 465 62 42  
a.v.polovinkin@gmail.com

**Полушкин Николай Игоревич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
79308089214  
nip@ipmras.ru

**Полякова Виктория Вадимовна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

ул. Большая Садовая, 105/42, Ростов-на-Дону,  
344006, Россия  
+79185702935  
vpolyakova@sfedu.ru

**Пономарев Сергей Артемьевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79231349186  
s.ponomarev1@g.nsu.ru

**Попов Владимир Геннадьевич**

АО «ИнфоТекС»  
127287, Москва, Старый Петровско-Разумовский проезд, 1/23, стр. 1  
+79154956121  
sokhatiy@gmail.com

**Попов Вячеслав Валентинович**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+78452272401  
porov\_slava@yahoo.co.uk

**Порохов Николай**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук  
119991, г.Москва, Ленинский пр-т, 32а  
+79153450520  
porokhov@gmail.com

**Поташин Сергей Олегович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79215611298  
sergeypotashin@gmail.com

**Потехин Александр Александрович**

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»  
Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603950, ГСП-486, Россия  
+79524775601  
potehinrf@gmail.com

**Приходько Кирилл Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
пл. ак. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия  
+74991969215  
prihodko\_ke@nrcki.ru

**Прошин Юрий Николаевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия  
+78432337342  
yurii.proshin@kpfu.ru

**Пугач Наталия Григорьевна**

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»  
Таллинская, д.34, Москва, 123458, Россия  
+7495 772-95-90\*15220  
pugach@magn.ru

**Пудалов Владимир Моисеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326780  
pudalov@lebedev.ru

**Пунегов Василий Ильич**

Физико-математический институт, Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»  
ул. Коммунистическая, 24, Сыктывкар, 167982, Россия  
+78212391461  
punegov@rambler.ru

**Путилов Алексей Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79092982681  
alputilov@mail.ru

**Рагозин Евгений Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326329  
enragozin@gmail.com

**Радовская Виктория Вадимовна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79690837102  
radovskaia.vv16@physics.msu.ru

**Разова Анна Александровна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79107997544  
ania.razova@yandex.ru

**Рахлин Максим Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79214059237  
maximrahlin@mail.ru

**Рахмонов Илхом Рауфович**

Объединённый институт ядерных исследований ул. Жолио-Кюри, 6 Дубна, Московская область, 141980, Россия  
+79057544760  
rahmonov@theor.jinr.ru

**Ревин Леонид Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79202577978  
rls@ipmras.ru

**Резник Александр Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+74179497  
reznik@ipmras.ru

**Резник Родион Романович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79110836901  
moment92@mail.ru

**Реунов Дмитрий Георгиевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79030527132  
reunov\_dima@ipmras.ru

**Родионов Илья Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, 105005, Россия  
+7(499) 263-6531  
irodionov@bmstu.ru

**Родионов Сергей Александрович**

Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова ул. Суцёвская, 22, Москва, 127055, Россия  
+79165743445  
sergeyroditionov93@yandex.ru

**Родионова Валерия Викторовна**

Балтийский федеральный университет им. И. Канта ул. А. Невского, 14, Калининград, 236016, Россия  
+79003468482  
valeriarodionova@gmail.com

**Рожанский Игорь Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79213063629  
rozhansky@gmail.com

**Ромашкин Руслан Витальевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79994638796  
romashkin.nstu@gmail.com

**Рощупкин Дмитрий Валентинович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук ул. Институтская 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79030071551  
rochtch@iptm.ru

**Рудаков Артур Олегович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79969601798  
rudackovartur@ipmras.ru

**Руденко Роман Юрьевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия  
+79659155869  
Romanrudenko781@gmail.com

**Рудык Николай Николаевич**

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета ул. Шевченко, 2Е, Таганрог, 347922, Россия  
78634371611  
nnrudyk@sfedu.ru

**Румянцев Владимир Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179482  
rumyantsev@ipmras.ru

**Рыбкин Артем Геннадиевич**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург,  
199034, Россия  
+79045558672  
arton@inbox.ru

**Рыбкина Анна Алексеевна**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург,  
199034, Россия  
+79602366935  
rybkina-anna@bk.ru

**Рыков Артём Владимирович**

Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79503694410  
rykovsc@gmail.com

**Рыльков Владимир Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение «Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
пл. ак. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия  
+74991967100доб.3293  
vvrylkov@mail.ru

**Рязанов Валерий Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики твердого тела Рос-  
сийской академии наук  
ул. ак. Осипяна, 2, Черноголовка, Московская  
обл., 142432, Россия  
+79031279538  
valery.ryazanov@gmail.com

**Савельев Дмитрий Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«МИРЭА — Российский технологический университет»  
119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78  
+79160205776  
dimsav94@gmail.com

**Савинов Денис Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179485#257  
savinovda@ipmras.ru

**Садова Елена Николаевна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79107970593  
sadova@ipmras.ru

**Садовников Александр Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Са-  
ратовский национальный исследовательский госу-  
дарственный университет им. Н.Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79033868480  
sadovnikovav@gmail.com

**Салашенко Николай Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314607692  
salashch@ipmras.ru

**Саломатова Елена Ивановна**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Са-  
ратовский национальный исследовательский госу-  
дарственный университет им. Н. Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79172005800  
e.salomatova2016@yandex.ru

**Самарцев Илья Владимирович**

Научно-исследовательский физико-технический  
институт федерального государственного автоном-  
ного образовательного учреждения высшего обра-  
зования «Национальный исследовательский Ниже-  
городский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79051924187  
woterbox@mail.ru

**Саматов Михаил Рустамович**

Московский институт электроники и математики  
им. А.Н. Тихонова Национального исследователь-  
ского университета «Высшая школа экономики»  
Таллинская, д. 34, Москва, 123458, Россия  
+79252170710  
mrsamatov@edu.hse.ru

**Самохвалов Алексей Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+7(831) 4179485 +229  
samokh@ipmras.ru

**Самохвалов Андрей Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

пр. Кронверкский, 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

+79214435524

andrey.s@burtsevlab.com

**Сапожников Максим Викторович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

+78314179485

msar@ipmras.ru

**Саранин Александр Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия

4232310426

asaranin@gmail.com

**Сатанин Аркадий Михайлович**

Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н.Л. Духова

ул. Суцневская, 22, Москва, 127055, Россия

+79775717415

sarkady@mail.ru

**Сафин Ансар Ризаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия

560459060656045

arsafin@gmail.com

**Сафонов Антон Игоревич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

пл. ак. Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия

+79267051102

safonovanton1996@mail.ru

**Сахаров Валентин Константинович**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия

+78452391236

valentin@sakharov.info

**Сахин Василий Олегович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный ис-

следовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

ул. Сибирский тракт, д. 10/7, Казань, 420029, Россия

+79509693296

urfinjus67@gmail.com

**Сахоненков Сергей Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет» Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

+79215517302

sergei.sakhonenkov@gmail.com

**Свалов Андрей Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

+73433899706

andrey.svalov@urfu.ru

**Селезнев Михаил Евгеньевич**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия

+79063152195

mixanich94@mail.ru

**Селезнёв Дмитрий Владимирович**

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

123458, Москва, ул. Таллинская, д.34

+79299131040

selezmsu@yandex.ru

**Семенов Михаил Борисович**

Пензенский государственный университет

440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

+79631020725

misha29.02.1@gmail.com

**Семиков Даниил Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

+79527706420

semikov.da@mail.ru

**Сербин Максим**

Венский университет

Universitätsring 1, 1010 Wien, Австрия

430664

mserbyn@ist.ac.at

**Серокурова Александра**

ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

ул. П. Бровки, 19, Минск, 220072, Республика Беларусь

+375445894373

aleksa.serokurova@yandex.by



**Сивков Виктор Николаевич**

Физико-математический институт, Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» ул. Коммунистическая, 24, Сыктывкар, 167982, Россия +78212391461 sivkovvn@mail.ru

**Сивков Данил Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Коми научный центр Уральского отделения РАН Ленинский проспект, 14, Сыктывкар, 167982, Россия +78212244262 danjorno@yandex.ru

**Ситник Леонид Леонидович**

Российская академия наук Ленинский просп., 14, Москва, 119991, Россия +79161008462 llsitnik@pran.ru

**Скоморохов Артем Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия +79210808400 artomskom@gmail.com

**Скорухов Евгений Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия +79063624981 evgeny@ipmras.ru

**Скрябина Ольга Викторовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия +79164308012 oskrya@gmail.com

**Слаутин Борис Николаевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия +79222185852 boris.slautin@urfu.ru

**Слипченко Сергей Олегович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия +79217541917 serghpl@mail.ioffe.ru

**Смагина Жанна Викторовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия +79137562615 smagina@isp.nsc.ru

**Смертин Руслан Маратович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия +79307041750 smertin\_ruslan@ipmras.ru

**Смирнов Александр Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия +79197240046 alsmir1988@mail.ru

**Снигирев Анатолий Александрович**

Балтийский федеральный университет им. И. Канта ул. А. Невского, 14, Калининград, 236016, Россия +79673546090 anatoly.snigirev@gmail.com

**Соломонов Антон Викторович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 190034, Россия +7911190297 asolomonov78@gmail.com

**Соснов Евгений Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» Московский пр., 26, Санкт-Петербург, 190013, Россия +78124949239 sosnov@lti-gti.ru

**Сошников Илья Петрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия +79219840160 ipsosh@beam.ioffe.ru

**Степанов Андрей Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия 649078314164907 step@ufp.appl.sci-nnov.ru

**Степина Наталья Петровна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+7333-26-24  
nstepina@mail.ru

**Степихова Маргарита Владимировна**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79101215820  
mst@ipmras.ru

**Степушкин Михаил Владимирович**

Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
пл. Введенского 1, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия  
+79160799262  
СОКРОВАЕНЕУ@yandex.ru

**Столяров Василий Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»  
ул. Керченская, 1а, корп. 1, Москва, 113303, Россия  
890089037789008  
vasiliy.stoliarov@gmail.com

**Сторожевых Михаил Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук  
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия  
+74995038144  
capoeirista@yandex.ru

**Сурдин Олег Михайлович**

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
пр. Мира, 37, Саров, 607188, Россия  
+78313027146  
mossom1@rambler.ru

**Суханова Татьяна Евгеньевна**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева»  
ул. Гапсальская, 1, Санкт-Петербург, 198035, Россия  
+79213984212  
tat\_sukhanova@bk.ru

**Сушков Артем Александрович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79107968101  
sushkovartem@gmail.com

**Тааев Таа Абдуллаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук  
ул. М. Ярагского, 94, Махачкала, Республика Дагестан, 367003, Россия  
+79624234911  
taaev89@mail.ru

**Тагиров Ленар Рафгатович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, Казань, 420029, Россия  
+79375926758  
ltagirov@mail.ru

**Таланов Юрий Иванович**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, Казань, 420029, Россия  
+79274093402  
talanov@kfti.knc.ru

**Тарасов Андрей Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79237087612  
tarasov1916@yandex.ru

**Тарасов Егор Валентинович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159  
+79147278583  
tarasov.ev@dvfu.ru

**Тарасов Михаил Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79165826043  
tarasov@hitech.cplire.ru

**Тарасов Сергей**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук

ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79063537253  
serge.tar@gmail.com

**Тарасова Елена Александровна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79101202550  
thelen@yandex.ru

**Тартаковский Илья Иосифович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965228287  
tartakov@issp.ac.ru

**Татарский Дмитрий Аркадьевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79101082536  
tatarsky@ipmras.ru

**Темиряева Марина Павловна**

Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук пл. Введенского 1, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия  
+79165289530  
mtemiryazeva@gmail.com

**Темная Ольга Станиславовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79263942365  
ostemnaya@gmail.com

**Терещенко Олег Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833307883  
teresh@isp.nsc.ru

**Тетельбаум Давид Исаакович**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79601711942  
tetelbaum@phys.unn.ru

**Тимофеев Вячеслав Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+7(383)330-79-34  
Vyacheslav.t@isp.nsc.ru

**Титова Анастасия Михайловна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79307077108  
asya\_titova95@mail.ru

**Титова Надежда Андреевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет» ул. Малая Пироговская, 1, стр.1, Москва, 119991, Россия  
+74992461870  
titovana@mail.ru

**Тиходеев Сергей Григорьевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79163852262  
tikh@gpi.ru

**Ткачев Владимир**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» ул. Суханова, 8, Владивосток, 690950, Россия  
+79242317581  
tkachev.vv@dvfu.ru

**Товстун Сергей Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук пр. ак. Семенова, 1, Черноголовка, 142432, Россия  
+79152783943  
tovstun@icp.ac.ru

**Толстихина Алла Леонидовна**

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук Ленинский пр., 59, Москва, 119333, Россия  
+74991351100  
alla@crys.ras.ru

**Торопов Михаил Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179476  
write75@rambler.ru

**Третьяков Олег Александрович**

University of New South Wales  
The University of New South Wales, Sydney, NSW  
2052, Australia  
+19793149655  
o.tretiakov@unsw.edu.au

**Трухин Валерий Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79217458563  
valembr@mail.ru

**Трушин Владимир Николаевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79036030749  
trushin@phys.unn.ru

**Тузиков Александр Михайлович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79092906263  
alex.tuzikov21@gmail.com

**Туманов Вадим Александрович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия  
+79510607215  
tumanvadim@yandex.ru

**Тупчая Александра Юрьевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+79841412116  
tupchaya@iacp.dvo.ru

**Туркин Ярослав Вячеславович**

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» Таллинская, д.34, Москва, 123458, Россия  
+79270539894  
turkin.yaroslav@gmail.com

**Турыгин Антон Павлович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79058060967  
anton.turygin@urfu.ru

**Удалов Олег Георгиевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79200438574  
udalovog@gmail.com

**Уражцев Алексей**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79261364660  
cksim@ya.ru

**Успенская Людмила Сергеевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79166459697  
uspenska@issp.ac.ru

**Уставщиков Сергей Сергеевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+783124179485  
sergey@ipmras.ru

**Уточкин Владимир**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79616390926  
xenonum@bk.ru

**Ушаков Дмитрий Владимирович**

Белорусский государственный университет пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Республика Беларусь  
+375 295017190  
ushakovdvu@gmail.com

**Фадеев Михаил Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79081593592  
fadeev@ipmras.ru

**Фатеев Денис Васильевич**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ра-

диотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+792710440628452391237  
fateevdv@yandex.ru

**Фатеева Елизавета Сергеевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
533349046053334  
fateeva.liza@yandex.ru

**Федотов Илья Алексеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79307134416  
fedotov.ilya.alekseevich@gmail.com

**Федулов Фёдор Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет»  
119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78  
+79035200948  
ostsilograf@ya.ru

**Федянин Анатолий Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79817962847  
fedianin.a.e@mail.ru

**Федянин Андрей Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74959394544  
fedyanin@nanolab.phys.msu.ru

**Филатов Дмитрий Олегович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79107979536  
dmitry\_filatov@inbox.ru

**Филатов Ярослав Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79818406663  
yaroslav.filatov@mail.ioffe.ru

**Филатова Елена Олеговна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
+79213334387  
elenaofilatova@mail.ru

**Филимонов Юрий Александрович**

Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019, Россия  
+78452272401  
yuri.a.filimonov@gmail.com

**Филиппов Николай Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79687595514  
filippov@ckp-miet.ru

**Фомин Лев Александрович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук  
ул. Институтская 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965244255  
fomin@iptm.ru

**Фоминов Яков Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук  
пр. ак. Семенова, 1а, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79104661489  
fominov@landau.ac.ru

**Фраерман Андрей Александрович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179482  
andr@ipmras.ru

**Хабибуллин Рустам Анварович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук  
Нагорный проезд, 7, корп. 8/0, Москва, 117105, Россия  
+79104637930  
khabibullin@isvch.ru

**Хазанова Софья Владиславовна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский

государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623308  
khazanova@phys.unn.ru

**Хаймович Иван Михайлович**

Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems  
Nöthnitzer Straße, 38, Dresden, Germany  
490000000000  
ivan.khaymovich@gmail.com

**Хайретдинова Динара Ринатовна**

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук  
Ленинский пр., 59, Москва, 119333, Россия  
+79258442557  
griadine@gmail.com

**Хан Федор Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79774582350  
khanfv@hitech.cplire.ru

**Харинцев Сергей Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия  
+7843215344  
skharint@gmail.com

**Хахулин Семён Андреевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»  
ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия  
+79111856370  
khsnmn@ya.ru

**Химич Сергей Григорьевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79026864890  
sergeysamedi@gmail.com

**Ходан Анатолий Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук  
Ленинский пр., 31, к. 4, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+79161023288  
anatole.khodan@gmail.com

**Хомицкий Денис Владимирович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314623304  
khomitsky@phys.unn.ru

**Хорошилов Владимир Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+79133768070  
khorosvladimir@mail.ru

**Хохлов Дмитрий Андреевич**

Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова  
ул. Суцвевская, 22, Москва, 127055, Россия  
+79852007166  
mitkh@yandex.ru

**Хохлов Дмитрий Ремович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74959391151  
khokhlov@mig.phys.msu.ru

**Хохлов Николай Евгеньевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79811235771  
n.e.khokhlov@yandex.ru

**Храпай Вадим Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79030026390  
dick@issp.ac.ru

**Хутиева Анна Борисовна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского»  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия  
+79271032772  
abkhutieva@gmail.com

**Хыдырова Селби**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»  
ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, 105005, Россия  
+79252973660  
hydyrova.selbi@yandex.ru



**Царьков Илья Михайлович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79200013422  
tsarkovm@gmail.com

**Цуканов Дмитрий Анатольевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук  
ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, Россия  
+79147061711  
tsukanov@iacp.dvo.ru

**Цыбин Николай Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314385555  
tsybin@ipmras.ru

**Цыпленков Вениамин Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179479  
Tsyplenkov1@yandex.ru

**Чарикова Татьяна Борисовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+73433783733  
charikova@imp.uran.ru

**Чекушкин Артем Михайлович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79661818657  
chekushkin@hitech.cplire.ru

**Ченцов Семен Игоревич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
310394991326448  
semtch@gmail.com

**Черненко Александр Васильевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79150042171  
chernemen@yandex.ru

**Чернышев Алексей Константинович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179476  
aleksej\_chernyshov@mail.ru

**Чешев Дмитрий Леонидович**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
ул. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия  
+79516288923  
dlc2@tpu.ru

**Чигинев Александр Валерьевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179486  
chig@ipmras.ru

**Чигинева Анна Борисовна**

Научно-исследовательский физико-технический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79108885037  
chigineva@nifti.unn.ru

**Чиков Александр Алексеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79126998740  
alex.chikov@yandex.ru

**Чиненков Максим Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
проезд 4806, 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия  
+79163352127  
chinenkov@inbox.ru

**Чуйкин Олег Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630092, Россия  
+79137756408  
ChuikinOA@yandex.ru

**Чхало Николай Иванович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79101094218  
chkhalo@ipmras.ru

**Шабельникова Яна Леонидовна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук  
ул. Институтская 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+74965244214  
janeshabeln@yandex.ru

**Шадрин Антон**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+79505485125  
shadrin.anton@urfu.ru

**Шамирзаев Тимур Сезгирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73833304475  
sha\_tim@mail.ru

**Шандыба Никита**

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета  
ул. Шевченко, 2Е, Таганрог, 347922, Россия  
+79286049241  
shandyba.nikita@gmail.com

**Шаненко Аркадий Аркадьевич**

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34  
+7(977) 363 3499  
ashanenko@hse.ru

**Шапошников Роман Анатольевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
42699+79036042699  
shaposhnikov-roma@mail.ru

**Шарафуллин Ильдус Фанисович**

Башкирский государственный университет  
ул. Заки Валиди, 32, Уфа, Респ. Башкортостан, 450076  
+79273418558  
SharafullinIF@yandex.ru

**Шарипов Мирзо Зокирович**

Бухарский инженерно-технологический институт  
ул. К. Муртазаева, 15, Бухара, 200117, Узбекистан  
+998936249449  
m.z.sharipov@rambler.ru

**Шаров Сергей**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79601732082  
sharov@ipmras.ru

**Шастин Валерий Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179479  
shastin@ipmras.ru

**Шатохин Алексей Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Ленинский проспект, 53, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74991326329  
shatohinal@gmail.com

**Шашков Иван Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+7(496)522-83-58  
shav@issp.ac.ru

**Шевченко Мария Сергеевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79212519094  
shevchenko@hitech.cplire.ru

**Шевырин Андрей**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук  
пр. Ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия  
+73308171  
shevandrey@isp.nsc.ru

**Шелухин Леонид Андреевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
+79818950651  
shelukhin@mail.ioffe.ru

**Шенина Мария Евгеньевна**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79506163118  
cyrix@bk.ru

**Шибалов Максим Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук  
119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 32а  
+79175757426  
maxshibalov@gmail.com

**Широких Никита Сергеевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+79123341746  
shirokikhnikita1@yandex.ru

**Шитов Сергей Витальевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+74956384646  
sergey3e@gmail.com

**Шканакина Мария Дмитриевна**

Российский квантовый центр  
ул. Новая, 100, БЦ «Урал», дер. Сколково, Московская обл., Россия  
+79879115670  
m.shkanakina@rqc.ru

**Шляпников Георгий Всеволодович**

Universite Paris Sud  
Bat. 100, 91405 Orsay, France  
+33169157349  
shlyapn@lptms.u-psud.fr

**Шоболова Тамара Александровна**

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»  
Тропинина, 47, Нижний Новгород, 603950, ГСП-486, Россия  
+79506090111  
tomasorokina@gmail.com

**Шпагина Елена**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
+79688117956  
mashpagina@yandex.ru

**Штром Игорь Викторович**

Институт аналитического приборостроения  
Рижский пр., 26, Санкт-Петербург, 190103  
+79112123425  
igorstrohm@mail.ru

**Шубина Татьяна Васильевна**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия  
15105(812)2927124  
shubina@beam.ioffe.ru

**Шуваев Алексей Михайлович**

Венский университет  
Universitätsring 1, 1010 Wien, Австрия  
+436802306967  
shuvaev@ifp.tuwien.ac.at

**Шукринов Юрий Маджнунович**

Объединённый институт ядерных исследований  
ул. Жолио-Кюри, 6 Дубна, Московская область, 141980, Россия  
+789150442981  
shukrinov@theor.jinr.ru

**Шульман Александр Яковлевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79036159102  
ash@cplire.ru

**Шур Владимир Яковлевич**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия  
+73433899568  
vladimir.shur@urfu.ru

**Шустин Максим Сергеевич**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036, Россия  
+79138308989  
mshustin@yandex.ru

**Щепетильников Антон Вячеславович**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук  
ул. ак. Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
244319153117986  
shchepetilnikov@issp.ac.ru

**Юнин Павел Андреевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179491  
yunin@ipmras.ru

**Юрасов Дмитрий Владимирович**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179482  
Inquisitor@ipmras.ru

**Юсупов Ренат Альбертович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009, Россия  
+79852819648  
yusupovrenat@hitech.cplire.ru

**Яблонский Артем Николаевич**

Институт физики микроструктур РАН — филиал  
Федерального государственного бюджетного учре-  
ждения науки «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской  
академии наук»  
ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия  
+78314179482  
yablonsk@ipmras.ru

**Яговцев Владимир Олегович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

123458, Москва, ул. Таллинская, д.34  
+79175949681  
vyagovtsev@hse.ru

**Якунин Михаил Викторович**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики металлов  
им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской  
академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
3433783644  
yakunin@imp.uran.ru

**Якунина Елена Михайловна**

Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт физики металлов  
им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской  
академии наук  
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Россия  
+79221461471  
eyakuninaart@gmail.com

**Яминский Игорь Владимирович**

Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования «Мос-  
ковский государственный университет им. М.В. Ло-  
моносова»  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия  
+74959391009  
yaminsky@nanoscopy.ru

**Авторский указатель**

- A**  
 Abdelmoneim S.A. 21  
 Abecassis B. 736  
 Aeppli G. 175  
 Antonov D.A. 409  
 Antonov I.S. 409  
 Antysheva G.D. 513  
 Aubert T. 736
- B**  
 Balanta M.A.G. 228  
 Bayer M. 1063  
 Beckmann D. 57  
 Bel'kov V.V. 655  
 Belsley M. 651  
 Bernardo C.R. 651  
 Bolotin K. 473  
 Botha A.E. 17  
 Boubanga-Tombet S. 660  
 Bulanov S.V. 517  
 Burdov V.A. 651  
 But D. 675  
 Buzdin A. 7, 19
- C**  
 Caputo M. 175  
 Cerqueira F. 651  
 Chkhalo N.I. 513, 515  
 Chuvilin A.L. 368  
 Croitoru M.D. 7  
 Cunha D. 651
- D**  
 Dann S. 517  
 De Filpo G. 792, 946  
 Deßmann N. 790, 1067  
 Dil J.H. 175  
 Dubinov A.A. 660  
 Dzelzainis T. 517
- E**  
 Eroms J. 655  
 Esirkepov T.Zh. 517
- F**  
 Fernández F. 926  
 Filatov D.O. 409
- G**  
 Galeckas A. 958  
 Ganichev S.D. 655  
 Garakhin S.A. 515  
 Giuliani R. 1031  
 Goltsman G.N. 9  
 Golub L.E. 655  
 Gorshkov O.N. 409
- Gradoboev A.V. 658  
 Grinvald I.I. 653  
 Grittani G.M. 517  
 Gubbiotti G. 342
- H**  
 Hens Z. 736  
 Hu Q. 415  
 Huber R. 655  
 Hübers H.-W. 844, 1067  
 Hull G. 517
- I**  
 Iikawa F. 228
- J**  
 Jeong T.M. 517
- K**  
 Kachorovskii V. 655, 660  
 Kando M. 517  
 Kapustin R.V. 653  
 Karczewski G. 760  
 Kawachi T. 517  
 Kent A.J. 926  
 Khitun A. 232  
 Kieler O. 53  
 Kiriyaama H. 517  
 Knap W. 660, 675  
 Koga J.K. 517  
 Koike M. 517  
 Kolesnikov A.O. 517  
 Kondo K. 517  
 Kopasov A.A. 11, 26  
 Kotov A.S. 409  
 Kotov A.V. 517  
 Kovalchuk S. 473  
 Krevchik P.V. 409  
 Krevchik V.D. 409  
 Kulikov K.V. 13, 17  
 Kumar M. 1031  
 Kumar N. 513, 515
- L**  
 Larrañaga A. 285  
 Lazpita P. 285  
 Lermusiaux L. 736  
 Lev L.L. 175  
 Lindner K. 655  
 Liu X. 415  
 Lounis B. 7  
 Lysenko S. 926
- M**  
 Martinez G. 675  
 Mel'nikov A.S. 11, 19, 26
- Mironov V.L. 173  
 Mitin V. 660  
 Mönch E. 655  
 Motamarri V. 15  
 Mruczkiewicz M. 208
- N**  
 Narahara K. 660  
 Nashaat M. 13, 17  
 Neely D. 517  
 Nezhdanov A.V. 513, 515  
 Noginova N. 214
- O**  
 Ogura K. 517  
 Orлита M. 992  
 Orlova K.N. 658  
 Otsuji T. 660  
 Ozheredov I.A. 409
- P**  
 Petrov V.N. 175  
 Petukhov A.N. 653  
 Pikuz T.A. 517  
 Pirozhkov A.S. 517  
 Plastovets V.D. 19  
 Pleshkov R.S. 513, 515  
 Pohl A. 1067  
 Polkovnikov V.N. 513, 515  
 Popov V.V. 660  
 Potashin S.O. 655  
 Pryakhina V.I. 653
- R**  
 Ragozin E.N. 517  
 Razumov A.V. 409  
 Riemann H. 1067  
 Rodrigues M. 651  
 Rúa A. 926  
 Rutckaia V.V. 1019  
 Ryzhii M. 660  
 Ryzhii V. 660
- S**  
 Sagisaka A. 517  
 Sameh M. 13, 17  
 Samoli M. 736  
 Sapozhnikov M.V. 173  
 Satou A. 660  
 Schellenberg P. 651  
 Semenov A.V. 9  
 Semenov I.M. 409  
 Semenov M.B. 409  
 Shadrivov I.V. 663  
 Shatokhin A.N. 517

Shkurinov A.P. 409  
 Shorokhov A.V. 409  
 Shukrinov Yu.M. 13, 17, 21  
 Shur M.S. 660  
 Silaev M.A. 24  
 Simonova A.V. 658  
 Soloviev A.A. 517  
 Strocov V.N. 175  
 Symes D.R. 517

**T**

Taniguchi T. 473, 655  
 Tatara G. 256  
 Tatarskiy D.A. 173  
 Taupin M. 127  
 Teissier R. 680  
 Tsar'kov I.M. 26

**U**

Usanov D.A. 175

**V**

Vasilevskiy M.I. 651  
 Vishnyakov E.A. 517  
 Vorotyntsev A.V. 653  
 Vorotyntsev I.V. 653

**W**

Watanabe K. 473, 655  
 Wei X. 415  
 Weiss D. 655  
 Wolf M.J. 57

**X**

Xu Z. 415

**Y**

Yadav D. 660  
 Yahniuk I. 655

**Z**

Zhamaldinov F.F. 658  
 Zhao Y. 415  
 Zharov A.A. 663  
 Zhu H. 484  
 Zinn T. 736

**A**

Абрамкин Д.С. 665  
 Абросимов Н.В. 1067, 790, 814  
 Абросимова Н.Д. 667, 669  
 Авдиенко П.С. 671  
 Аверина Н.И. 236, 673, 814  
 Аверкиев Н.С. 675  
 Аверьянов Д.В. 177  
 Агранат М.Б. 710  
 Азаров А.Ю. 958

Акзянов Р.Ш. 149  
 Акимов А.В. 926  
 Акишева А.В. 179  
 Акмаев М.А. 676  
 Акопян Н. 832, 994  
 Аладышкин А.Ю. 411, 413  
 Александров А.А. 242  
 Александров И.А. 964  
 Алексеев П. 1077  
 Алексеев П.А. 704, 778, 786  
 Алексеев С.Г. 116, 181  
 Алешкин В.Я. 678, 691, 697, 776, 881, 916, 920, 992, 996, 1081  
 Аликин Д.О. 415  
 Аликин Ю.М. 415  
 Алтухов И.В. 680, 972  
 Альперович В.Л. 1055  
 Алябина Н.А. 1035  
 Аминев Д.Ф. 802, 846  
 Амиров А.А. 313, 344  
 Амосов В.Н. 869  
 Андреев Б.А. 830, 903  
 Андреева М.А. 519  
 Андрианов А.И. 682  
 Аникиева Ю.А. 388  
 Анисимов А.Н. 1008  
 Анкудинов А.В. 279  
 Антипова В.Н. 313  
 Антонов А.В. 28, 1000  
 Антонов Д.А. 437  
 Антонов И.Н. 183, 437, 498, 858, 1071  
 Антонова И.В. 684, 1017  
 Антюшин Е.С. 521, 562  
 Аплеснин С.С. 185  
 Арапкина Л.В. 1023  
 Арсенин А.В. 1023  
 Арутюнов К.Ю. 30  
 Архипов М.В. 687  
 Архипов Р.М. 687  
 Архипова Е.А. 32, 689, 887, 968, 1006  
 Атепалихин А.А. 34  
 Атсаркин В.А. 214  
 Афанасьев Д.А. 762  
 Афанасьев М.М. 760  
 Афоненко А.А. 691, 693, 768, 948, 1039, 1043  
 Афоненко Ан.А. 693  
 Ахматханов А.Р. 191, 494  
 Ахсаханян А.А. 521, 624  
 Ахундов И.О. 820, 836, 1025

**Б**

Бабушкин И.В. 687  
 Багаев В.С. 871, 954

Багаев Т.А. 1043  
 Баграев Н.Т. 695  
 Баева Э.М. 36, 38  
 Баженов А.О. 1017  
 Баишева А.Х. 396  
 Байдакова М.В. 804  
 Байдусь Н.В. 697, 780, 784, 804, 948, 1049, 1061  
 Бакаров А.К. 1069  
 Бакина К.А. 566, 604, 606  
 Баклашов Д.И. 784  
 Бакурский С.В. 129  
 Балакирев С.В. 1065  
 Балясников Д.М. 682  
 Баранов А.Н. 680  
 Баранов Д.С. 129  
 Баранов П.Г. 1008  
 Бараш Ю.С. 159  
 Барков К.А. 151  
 Барышева М.М. 523  
 Барышникова К.В. 1019  
 Бахракова М.В. 40, 51, 112, 770  
 Батов И.Е. 57  
 Баулин Р.А. 519  
 Бегинин Е.Н. 208, 214, 311, 342, 390  
 Бедин С.А. 187  
 Бекин Н.А. 699  
 Белобородов И.С. 378  
 Белов А.И. 852, 958, 1031  
 Белов Д.А. 700  
 Белов П.А. 687  
 Белодедов М.В. 250  
 Белоновский А.В. 702, 729, 832, 930  
 Белых В.В. 189, 676, 856, 891  
 Бер Б.Я. 966  
 Березина Д.С. 786  
 Березовская Т.Н. 564  
 Берковиц В.Л. 704  
 Бернацкий Д.П. 417  
 Беспалов А.А. 42  
 Бибилова В.В. 706  
 Бизяев Д.А. 191, 419  
 Благодаткин А.В. 44  
 Блинов И. 246  
 Блошкин А.А. 1033  
 Бляхман Ф.А. 265  
 Бобров А.И. 708, 1049  
 Бобров Ю.А. 421  
 Богачев С.А. 557  
 Богданов А.А. 459  
 Богданов С.А. 689, 738, 887  
 Богомоллов Д.Б. 665  
 Бодров С.Б. 710  
 Боженькина А.Д. 711



- Божко С.И. 413  
 Бокова-Сирош С.Н. 905  
 Болдин М.С. 772  
 Болгалин А.И. 85  
 Большинов В.В. 74  
 Большаков А.П. 869, 972  
 Большаков Е.П. 598  
 Бондаренко Л.В. 431, 439, 451, 481, 492, 924  
 Бородавченко О.М. 810  
 Бородин Б.Р. 786, 826, 1077  
 Боряков А.В. 708  
 Бострем И.Г. 238  
 Брагинский Л.С. 750  
 Бреев И.Д. 1008  
 Бричкин А.С. 1059  
 Бронзов Т.П. 598  
 Брюквина Л.И. 453  
 Бугаев А.В. 525  
 Бугай К.Е. 873  
 Буздин А.И. 121  
 Бузников Н.А. 285  
 Буйлов Н.С. 151  
 Бурдов В.А. 713  
 Буренина Д.С. 782  
 Бурцев А.А. 714  
 Бурцев В.А. 598  
 Бухараев А.А. 191, 419, 467, 469  
 Бухтияров А.В. 572, 1029  
 Бушуев В.А. 527  
 Бушуйкин П.А. 790  
 Быков А.И. 193, 195  
 Быков Ан.В. 421  
 Быков В.А. 183, 421  
 Бюхнер Б. 76
- В**
- Валидов А.А. 76  
 Валиулин В.Э. 293  
 Вальков В.В. 46  
 Варавин В.С. 920  
 Вартапетов С.К. 869  
 Василиадис И. 30  
 Васильев А.Н. 193  
 Васильев В.К. 28  
 Васильев Д.Д. 151  
 Васильев Р.Б. 1014  
 Васильев Ю.Б. 716  
 Васильевский А.А. 1039  
 Васильевский И.С. 693, 840, 939, 1043  
 Васин К.В. 240  
 Васьковский В.О. 350  
 Вдовичева Н.К. 88, 127  
 Веденев А.С. 362  
 Ведь М.В. 197, 228, 772, 808, 854  
 Ведяев А.В. 242
- Вейшторг И.П. 1008  
 Вековшинин Ю.Е. 431  
 Вербус В.А. 1019  
 Верхогляд А.Г. 758  
 Вершинин А.В. 834  
 Веселов Д.А. 912  
 Вилков Е.А. 246, 258, 299, 500  
 Вилков И.В. 432, 604  
 Винарский В.П. 907  
 Виниченко А.Н. 840, 939, 1043  
 Винниченко М.Я. 718  
 Виноградов А.С. 606  
 Винокуров П.В. 676  
 Вихарев А.Л. 689, 738, 887  
 Вихрова О.В. 183, 197, 199, 252, 756  
 Вишняков Е.А. 529, 574  
 Владимирова М. 901  
 Власенко В.А. 47, 83  
 Власов А.С. 834  
 Водзяновский Я.О. 49  
 Водолазов Д.Ю. 144  
 Вожаков В.А. 51  
 Войцеховский А.В. 720  
 Волков В.А. 722, 800  
 Волков В.С. 1023  
 Волков Н.А. 912  
 Волков О.Ю. 723, 768  
 Волков П.В. 1006  
 Володин В.А. 810  
 Волченко Е.Н. 325  
 Вopilкин Е.А. 1006  
 Воробьев П.А. 59  
 Воронин А.В. 772, 808, 854  
 Воронцов В.А. 437, 682  
 Востоков Н.В. 479, 726  
 Вывенко О.Ф. 473  
 Вылегжанина М.Э. 488  
 Высоцкий С.Л. 263, 301, 303, 348, 357, 232, 352, 354
- Г**
- Гавриленко В.И. 691, 700, 844, 881, 934, 1000, 1037, 1039, 1043  
 Гадомская А.В. 728  
 Гайнутдинов Р.В. 490  
 Гайсин А.У. 551, 610  
 Галанова С.В. 193, 195  
 Галиев Р.Р. 700, 768, 1043  
 Галимов А.И. 860  
 Галин М.А. 53  
 Галицын Ю.Г. 463, 914  
 Гамов Н.А. 786  
 Гарахин С.А. 531, 533, 545, 582, 584, 626
- Гареев К.Г. 388  
 Гареева З.В. 201  
 Гарифуллин И.А. 76, 78  
 Гарифьянов Н.Н. 76, 135, 899  
 Гасенин В.В. 1075  
 Гатин А.К. 434, 443  
 Герасименко А.В. 366  
 Герасименко А.Ю. 250  
 Герасимов В.В. 790  
 Германенко А.В. 916  
 Гетман Д.В. 598  
 Гимазов И.И. 55, 135  
 Гинзбург Н.С. 862  
 Гипшиус А. 246  
 Гипшиус Н.А. 742, 766, 889  
 Гиршова Е.И. 702, 729, 930  
 Глазкова Д.А. 1002  
 Глазов М.М. 676, 731  
 Глазов С.Ю. 734  
 Голина О.А. 473  
 Голдырева Е.С. 1017  
 Голиков О.Л. 1027, 1045  
 Голикова Т.Е. 57  
 Головатенко А.А. 736  
 Головчанский И. 475  
 Голубок А.О. 459  
 Гольцман Г.Н. 36, 38  
 Голяшов В.А. 820, 836, 1017, 1025, 1029  
 Гончаров Б.В. 61, 63  
 Горай Л.И. 564  
 Горбачев А.М. 738, 887  
 Гордеева А.В. 123  
 Горев Р.В. 217, 436  
 Горелов А.А. 939  
 Горн Д.И. 720  
 Горнаков В.С. 203, 398  
 Горский А.С. 15  
 Горчавкина А.А. 40  
 Горшков А.П. 858, 1049  
 Горшков Д.В. 836  
 Горшков О.Н. 437, 498, 1071  
 Горшунов Б.П. 147  
 Горьковенко А.Н. 350  
 Горюнов А.В. 1006  
 Горюнов Ю.В. 206  
 Грачев А.А. 208  
 Грибакин Б.Ф. 740  
 Грибко В.В. 535  
 Григорьев П.Д. 59  
 Гридчин В.О. 994, 1077  
 Гринберг Я.С. 133, 157  
 Гришин М.В. 434, 443  
 Громько Д.А. 742  
 Грузнев Д.В. 431, 439, 451, 481, 492, 924

- Грязнева Т.А. 744  
 Губанов В.А. 210, 212, 214  
 Губанова Ю.А. 214  
 Гудина С.В. 746  
 Гультиков Н.В. 748, 912  
 Гуляев Д.В. 750  
 Гунбина А.А. 137  
 Гурович Б.А. 61, 63  
 Гусев Е.Э. 547  
 Гусев Н.С. 144, 216, 217, 236, 295, 332, 336, 346, 368, 436, 673  
 Гусев П.Э. 547  
 Гусев С.А. 144, 216, 295, 368, 370, 291  
 Гусева В.Е. 537  
 Гусева Ю.А. 782, 786  
 Гусейнов Д.В. 236, 673, 814  
 Гутаковский А.К. 665  
 Гущина Е.В. 752
- Д**  
 Давыдов В.Ю. 893, 895  
 Данилов Д.В. 199  
 Данилов Ю.А. 183, 197, 199, 224, 252, 754, 756  
 Данильцев В.М. 968  
 Дворецкий Д.А. 873  
 Дворецкий С.А. 720, 746, 758, 881, 920, 934, 992, 1000, 1081  
 Двуреченский А.В. 810, 1012  
 Девицкий О.В. 137  
 Девятериков Д.И. 220, 404  
 Девятов Э.В. 159, 962  
 Дегоев М.М. 760  
 Дегтяренко А.Ю. 47  
 Дедкова А.А. 539, 541  
 Деева А.А. 954  
 Деменев А.А. 889  
 Дементьев П.А. 441  
 Дементьева Е.В. 441  
 Демидов В.В. 214  
 Демидов Е.С. 327, 329, 762  
 Демидова Н.Е. 762  
 Демин В.А. 297, 362  
 Демин Г.Д. 222, 234, 543, 553, 744  
 Демина П.Б. 197, 224, 228, 248, 772, 808, 854  
 Денисов К.С. 338  
 Денисов Н.В. 465, 481  
 Денисов С.А. 437, 858, 1035  
 Денисова Е.А. 267, 392  
 Дерябин С.А. 810  
 Джапаридзе М.В. 384
- Джиоев Р.И. 885  
 Джумалиев А.С. 348  
 Дзядух С.М. 720  
 Дивин Ю.Я. 723  
 Дижур С.Е. 181, 680, 972  
 Дикарева Н.В. 772  
 Димитракопулос Г.П. 30  
 Дирко В.В. 907  
 Дмитриев Д.В. 750, 764, 848  
 Дмитриев Д.С. 562  
 Дмитриева О.А. 766  
 Днепровский В.С. 1014  
 Долбня И.П. 626  
 Долгов А.К. 768  
 Долгополова М.В. 392  
 Долуденко И.М. 187, 226, 246, 386, 500  
 Дорофеев А.В. 299  
 Дорохин М.В. 197, 199, 216, 224, 228, 248, 271, 277, 770, 772, 808, 854, 877, 1073  
 Дохликова Н.В. 443  
 Драгунова А.С. 834, 994  
 Дремов В.В. 475  
 Дровосеков А.Б. 230  
 Дроздов М.Н. 669, 689, 726, 738, 887, 968  
 Дрязгов М.А. 65  
 Дубинин И.С. 545  
 Дубинов А.А. 678, 691, 774, 776, 881, 1000  
 Дудин Ю.А. 183, 224, 252, 708, 1073  
 Дудко Г.М. 232, 263, 348, 352, 354, 357  
 Дулебо А.И. 838  
 Дунаевский М.С. 441, 752, 778  
 Дуров К.В. 780, 804  
 Дьяков С.А. 742, 974, 1012, 1021  
 Дюжев Н.А. 222, 234, 445, 539, 541, 543, 547, 744  
 Дюжев Н.И. 553  
 Дюжиков И.Н. 723, 768
- Е**  
 Евдокимов А.Е. 885  
 Европейцев Е.А. 782, 786  
 Евсиков И.Д. 445  
 Егоров С.В. 74  
 Ежевский А.А. 236, 673, 814  
 Екомасов Е.Г. 238  
 Елесин А.Г. 758  
 Елисеев И.А. 826, 893  
 Елисеев Н.Н. 714
- Елисеев С.И. 598  
 Елисратов А.А. 67  
 Елькина А.И. 32, 53  
 Емельянов А.В. 297, 362  
 Емельянов Е.А. 665  
 Еналдиев В.В. 800  
 Еремеев С.В. 924  
 Еременко М.М. 1065  
 Еремин М.В. 240, 309  
 Ерофеева И.В. 808, 854  
 Ерхова Н.Ф. 529, 557, 612  
 Ершов А.В. 780, 792, 804, 858, 708  
 Ерыженков А.В. 340, 1002
- Ж**  
 Жакетов В.Д. 68, 220  
 Железнякова Д.Е. 135  
 Живулько В.Д. 810  
 Жигалина О. 246  
 Жидяев К.С. 784, 948, 950, 1061  
 Жижин Е.В. 895  
 Жмерик В.Н. 782, 786  
 Жолудев М.С. 788  
 Жук Н.А. 566  
 Жукавин Р.Х. 790, 842, 1067  
 Жуков А.А. 447, 449  
 Жуков А.О. 792, 946  
 Жуков Н.Д. 794  
 Жукова Е.С. 147, 500  
 Журавлев К.С. 463, 750, 764, 848, 908, 914, 964, 966  
 Журавлев М.Е. 242  
 Журенко С. 246
- З**  
 Забавичев И.Ю. 706, 797, 1045  
 Заболотных А.А. 722, 799, 800, 801  
 Забродин И.Г. 531, 562  
 Заверткин П.С. 529  
 Заворницын Р.С. 244  
 Завражнов А.Ю. 808  
 Завьялов В.В. 30  
 Загороднев И.В. 801  
 Загорский Д.Л. 226, 246, 500  
 Задиранов Ю.М. 782  
 Зазымкина Д.А. 802  
 Зайцев А.В. 780, 804  
 Зайцев С.И. 504  
 Зайцева В.Е. 142  
 Зайцев-Зотов С.В. 496  
 Зарипов Р.Б. 55  
 Заславский В.Ю. 862  
 Захаров А.М. 706

- Захаров В.Е. 877  
 Захаров Д.М. 137  
 Захожев К.Е. 806  
 Звездин А.К. 195, 201  
 Звездин К.А. 400  
 Зверев М.М. 786  
 Звонков Б.Н. 199, 228, 271, 877, 950  
 Здоровейшев А.В. 197, 224, 248, 252, 277, 364, 756, 808, 852  
 Здоровейшев Д.А. 183, 248, 252, 277, 772, 808  
 Зеленов Ф.В. 185  
 Земляков В.Е. 1027  
 Зенова Е.В. 119, 163, 936  
 Зиганшин М.А. 467, 469  
 Зиганшина С.А. 467, 469  
 Зиновьев В.А. 810, 812, 1012  
 Зиновьева А.Ф. 810  
 Злотников А.О. 70  
 Золотарев К.В. 572  
 Золотов Н.А. 388  
 Золотов Ф.И. 38  
 Зорина М.В. 549, 576, 578, 620, 624  
 Зотов А.В. 431, 439, 451, 465, 481, 492, 924  
 Зубавичус Я.В. 1029  
 Зубанов И.А. 236, 673, 814  
 Зубков С.Ю. 271, 380, 754, 780, 804, 877, 1073  
 Зуев С.Ю. 586, 521, 523, 531, 608, 612  
 Зыбцев С.Г. 952, 982  
 Зябловский А.А. 299
- И**  
 Иванов А.А. 72, 153, 315  
 Иванов А.С. 816, 1045  
 Иванов В.Е. 350  
 Иванов Д.А. 461  
 Иванов Н.А. 453  
 Иванов С.В. 786  
 Ивков С.А. 151  
 Ивлешкин Д.В. 529  
 Игнатъев И.В. 740, 918  
 Иго А.В. 818  
 Иконников А.В. 700, 956  
 Ильин А.И. 72  
 Ильин Н.А. 756  
 Ильин О.И. 455, 998  
 Ильина М.В. 455, 998  
 Ильинская Н.Д. 680  
 Илькив И.В. 832, 834  
 Ильясов А.И. 362  
 Ионин А.С. 74
- Ионин В.В. 714  
 Иоселевич П.А. 110  
 Исаев В.А. 689, 738, 887  
 Исаенко С.И. 606  
 Исмагилов Р.Р. 905  
 Исхаков Р.С. 267, 392  
 Ичеткин Д.В. 362  
 Ичкитидзе Л.П. 250  
 Ищенко Д.В. 820, 836, 1025
- К**  
 Кабаев К.С. 228  
 Кабальнов Ю.А. 897  
 Кабанов Ю.П. 203, 398  
 Кавеев А.К. 822  
 Каверин Б.С. 432, 604, 606  
 Кавокин К.В. 760, 885, 901  
 Каган М.С. 680, 972  
 Кадыров Л.С. 147  
 Казанов Д.Р. 826  
 Казанцев Д.М. 1055  
 Казанцев Д.Ю. 966  
 Казанцева И.А. 498  
 Калашников Д.С. 475  
 Калашникова А.М. 926  
 Калевич В.К. 760, 901  
 Калентьева И.Л. 183, 199, 224, 252  
 Калинин Ю.Е. 362  
 Калинина Е.А. 236, 673, 814  
 Калинин С.В. 166  
 Калининников М.А. 830, 903  
 Калитеевский М.А. 702, 729, 832, 930  
 Калябин Д.В. 299, 374  
 Камашев А.А. 76, 78  
 Каневский В. 246  
 Караборчев А.А. 850  
 Каравайников А.В. 291  
 Карамов Д.Д. 457  
 Каратаев А.В. 551, 610  
 Каратеев И.А. 47, 177  
 Карачкин С.В. 706  
 Караштин Е.А. 217, 254, 256, 258, 289  
 Кардакова А.И. 38  
 Карелина Л.Н. 74  
 Карлина Л.Б. 834  
 Каськов И.А. 562  
 Катаев В. 76  
 Кашин В.В. 952  
 Керсновский Е.С. 151  
 Кетков С.Ю. 432  
 Кехигас Т. 30  
 Кецо В.А. 360
- Кибис О.В. 80, 260  
 Ким П.П. 543, 553  
 Ким Т.М. 102, 166  
 Кириенко В.В. 1033  
 Кириченко А.Н. 869  
 Кириченко А.С. 557  
 Кириченко Д.В. 1065  
 Киселев А.В. 714  
 Кислинский Ю.В. 261, 269  
 Кичин Г.А. 400  
 Клементьев Д.С. 708  
 Кленов Н.В. 40, 51  
 Клепикова А.С. 153  
 Климов А.А. 269  
 Климов А.Э. 836  
 Клоков А.Ю. 838  
 Клочков А.Н. 840, 939, 1043  
 Князев Б.А. 790  
 Ковалев О.А. 230  
 Ковалевский К.А. 790, 842, 1067  
 Коваленко С.Ю. 566  
 Кодочигов Н.Е. 1027  
 Кожевников А.В. 232, 263, 301, 303, 352, 354, 357  
 Кожина Е.П. 187  
 Кожухов А.С. 914, 966, 1025  
 Козабаранов Р.В. 193, 195, 275  
 Козлов А.Г. 366  
 Козлов Д.В. 844  
 Козлов Н.В. 265  
 Козлов Ю.Ю. 980  
 Козловский В.И. 786, 846  
 Козырев А.А. 912  
 Козырев Н.В. 760  
 Колбатова А.И. 36  
 Колесников А.О. 555, 574  
 Колесников Н.Н. 159, 962  
 Колесникова В.Г. 313  
 Колесов В.В. 952  
 Колмычек И.А. 281, 295  
 Колобкова Е.В. 891  
 Колосовский Д.А. 764, 848  
 Колосовский Е.А. 750  
 Колпакова Ю.И. 547  
 Коляда Д.В. 850  
 Комаров В.А. 325  
 Комаров Д.А. 63  
 Комков О.С. 671, 850, 1033, 1051  
 Комнину Ф. 30  
 Комогорцев С.В. 392, 267  
 Конаков А.А. 852, 922, 958  
 Конашук А.С. 525

- Кондратьев О.А. 177  
 Константи́нидис Г. 30  
 Константи́нян К.И. 261, 269  
 Коплак О.В. 203  
 Коптев Е.С. 1017  
 Копьев П.С. 1010  
 Корнеев А.А. 65  
 Корнеева Ю.П. 65  
 Корнилов В.М. 457  
 Королев Д.С. 852, 958, 1031  
 Королева А.В. 895  
 Коростелин Ю.В. 846  
 Короткова М.Г. 854  
 Коротнева А.Р. 189, 856  
 Коршунов А.С. 193, 195, 275  
 Коршунов М.М. 81  
 Коротин А.И. 710  
 Коряжкина М.Н. 858, 1071  
 Косо́боков М.С. 415, 494  
 Косо́букин В.А. 704  
 Костюченко Н.В. 195  
 Косырев Н.Н. 325  
 Котляр В.Г. 492  
 Котляр К.П. 832, 834, 994, 1077  
 Котов В.В. 421  
 Котова Л.В. 860  
 Котомина В.Е. 437  
 Кох К.А. 1017, 1025  
 Коханенко А.П. 907  
 Кочаровская Е.Р. 862, 864, 866  
 Кочаровский В.В. 139, 864, 866  
 Кочаровский Вл.В. 139, 864, 866  
 Кочиев М.В. 676  
 Кошелец В.П. 34, 49, 147, 155, 161, 168  
 Кошельчук М.Ю. 706  
 Кравцов Е.А. 220, 327, 404  
 Краев С.А. 689, 726, 968, 1006  
 Краси́лин А.А. 279  
 Краси́льник З.Ф. 830, 903, 1021  
 Краси́льников А.В. 869  
 Краси́льникова Л.В. 903  
 Криво́бок В.С. 846, 802, 838, 871, 954  
 Криштоп В.Г. 500, 873  
 Круглов А.В. 437, 858  
 Крупин А.Ю. 810  
 Крыжа́новская Н.В. 834, 994  
 Крюков А.В. 784  
 Крюков Р.Н. 183, 271, 277, 380, 754, 756, 780, 804, 852, 877, 879, 1031, 1073  
 Кугель К.И. 293  
 Кудасов Ю.Б. 193, 195, 273, 275  
 Кудрин А.В. 197, 199, 380, 879, 1031  
 Кудрявцев К.Е. 830, 881, 903, 934, 1037  
 Кудрявцева Е.О. 469  
 Кузин С.В. 557, 612  
 Кузнецов А.Ю. 958  
 Кузнецов М.А. 327, 329  
 Кузнецов Ю.М. 183, 199, 248, 277, 808, 854, 1073  
 Кузнецова И.А. 883  
 Кузнецова М.С. 885  
 Кузьмин Л.С. 44, 123  
 Кузьмин С.А. 338  
 Кузьмичев С.А. 83, 85  
 Кузьмичева Т.Е. 83, 85  
 Кукенов О.И. 907  
 Куковицкий Е.Ф. 1004  
 Кукотенко В.В. 790  
 Кукушкин В.А. 887, 1061  
 Кукушкин С.А. 95  
 Кулагина М.М. 782, 786  
 Кулаковский В.Д. 889  
 Кулебякина Е.В. 891  
 Кумар Н. 578, 582, 584  
 Кункель Т.С. 279  
 Кунцевич А.Ю. 87, 838  
 Куприянов М.Ю. 129  
 Курдюбов А.С. 740  
 Курин В.В. 53, 88  
 Курляндская Г.В. 265, 285, 350  
 Кусраев Ю.Г. 760  
 Кутин А.А. 488  
 Кутузов Л.В. 61, 63  
  
**Л**  
 Ладугин М.А. 748, 912, 980, 1043  
 Латышев А.В. 986  
 Лачинов А.Н. 457  
 Лебедев А.А. 893  
 Лебедев Д.В. 459  
 Лебедев М.В. 895  
 Лебедев С.В. 895  
 Лебедев С.П. 893  
 Лебединская А.Е. 897  
 Левада Е.В. 313  
 Левин А.А. 804  
 Левицкий В.С. 704  
 Левичев М.Ю. 53, 114, 144  
 Леесмент С.И. 421  
 Леонардо Л. 832  
 Леонтьев А.В. 78, 899  
 Леонтьев А.П. 281  
 Лепаловский В.Н. 285, 350  
 Лесников В.П. 197, 277, 380, 754, 756, 879  
 Лешко А.Ю. 1010  
 Литвяк В.М. 901  
 Лифшиц М.Б. 338, 675  
 Лихачев А.И. 901  
 Лихолетова М.В. 1002  
 Лобаев М.А. 689, 738, 887  
 Лобанов Д.Н. 830, 903  
 Лобинцов А.В. 980  
 Лобода И.П. 612  
 Логинов А.Б. 905  
 Логинов Б.А. 905, 952  
 Логунов М.В. 275  
 Лозовой К.А. 907  
 Локк Э.Г. 210, 283, 311, 390  
 Ломов А.А. 137  
 Лопатин А.Я. 521, 523, 531, 533, 560, 580, 612  
 Лотин А.А. 714  
 Лошкарев И.Д. 1033  
 Лубенченко А.В. 461  
 Лубенченко О.И. 461  
 Лузанов В.А. 181  
 Луккарева С.А. 386  
 Лукьяненко А.В. 321  
 Лукьянов А.Ю. 1006  
 Лукьянцев Д.С. 461  
 Лучин В.И. 523, 560  
 Лысов М.С. 323  
 Львова Т.В. 895  
 Лютецкий А.В. 912  
 Ляшко С.Д. 291  
  
**М**  
 Мазов Л.С. 90, 92, 94  
 Майдэбура Я.Е. 908  
 Майзлах А.А. 496  
 Макаров И.В. 193, 195, 275  
 Макаров С.Н. 758  
 Макаров Ю.Н. 893  
 Макарова И.П. 490  
 Макарова М.В. 244  
 Макаровичкин И.А. 350  
 Макарец И.В. 711  
 Максимов А.А. 910  
 Малехонова Н.А. 1049  
 Малехонова Н.В. 708  
 Малиева Е.М. 63

- Малин Т.В. 463, 908, 914, 964, 966  
 Малкин А.М. 862  
 Малых Д.А. 752  
 Малышев И.В. 281, 521, 562, 592, 612, 614, 622, 626  
 Мамин Р.Ф. 78, 899  
 Мамонов Е.А. 295, 336  
 Мансуров В.Г. 463, 908, 914  
 Манцевич В.Н. 1014  
 Мараров В.В. 465  
 Маремьянин К.В. 1043  
 Маркелов А.С. 535, 946  
 Мармалюк А.А. 748, 912, 980, 1043  
 Мартынов Л.Н. 780  
 Мартышкин А.А. 283  
 Маслов Д.А. 193, 195, 275  
 Мастеров Д.В. 28, 32, 96, 98, 114  
 Матецкий А.В. 465, 481  
 Матрцова Е.А. 10, 44  
 Матюнина К.С. 852  
 Махиборода М.А. 547  
 Махмудиан М.М. 1079  
 Махмудиан Мехрад М. 1079  
 Махов И.С. 718  
 Машанов В.И. 850, 1033  
 Машин А.И. 762, 792, 946  
 Медведев Б.К. 234  
 Мельников А.С. 121, 127  
 Мельников Г.Ю. 285  
 Менщиков Р.В. 956  
 Меньшиков Р.В. 720  
 Меренков А.В. 102, 166  
 Мехоношин Д.С. 323  
 Мещанинов С.А. 869  
 Микитчук Е.П. 729  
 Милахин Д.С. 463, 914, 964  
 Миляев М.А. 244, 287  
 Миньков Г.М. 916  
 Миргородская Е.Н. 364  
 Миронов В.Л. 289, 482  
 Миронов С.В. 121  
 Михайленко М.С. 562, 576, 578, 612, 620, 622  
 Михайлов А.В. 885, 918  
 Михайлов А.Н. 28, 852, 958, 960, 1031  
 Михайлов Н.Н. 720, 746, 758, 881, 916, 920, 934, 956, 992, 1000, 1037, 1081  
 Михайлова А.М. 922  
 Михайлова И.В. 151  
 Михайлова Т.В. 291  
 Михалевский В.А. 714  
 Михалюк А.Н. 431, 439, 451, 481, 492, 924  
 Михеенков А.В. 293  
 Мишин А.В. 864, 866  
 Могунов Я.А. 926  
 Можаров А.М. 459  
 Моисеев К.М. 151  
 Моисеенко И.М. 928, 1041  
 Молостова О.С. 780  
 Монахов М.П. 193, 195  
 Морозов И.В. 83, 85  
 Морозов К.М. 702, 729, 930  
 Морозов М.Ю. 932  
 Морозов С.В. 28, 691, 700, 788, 844, 881, 934, 992, 1000, 1037  
 Морозова А.С. 467, 469  
 Морозова Е.Е. 1037  
 Москаль И.Е. 261  
 Москвин А.С. 104  
 Мотин П.А. 502  
 Мохов А.А. 267  
 Мохов Д.В. 564  
 Мохов Е.Н. 1008  
 Мудрый А.В. 810  
 Мумляков А.М. 119, 163, 936  
 Мурзанев А.А. 710  
 Мурзина Т.В. 295, 336, 372  
 Мусатов В.И. 384  
 Мухаматчин К.Р. 770  
 Мухин И.С. 459  
 Мяконьких А.В. 976
- Н**
- Набиуллин И.С. 939  
 Нагаев К.Э. 942  
 Нагалюк С.С. 1008  
 Назаров А.А. 630  
 Напольский К.С. 281  
 Настовьяк А.Г. 944  
 Наумова Л.И. 244, 287  
 Нащекин А.В. 564, 901  
 Небогин С.А. 453  
 Неверов В.Н. 749, 1081  
 Негин А.В. 708  
 Недвига А.С. 291  
 Нежданов А.В. 183, 498, 682, 762, 780, 792, 804, 852, 946, 708, 1031, 1049  
 Незнахин Д.А. 267, 392  
 Неизвестный И.Г. 944  
 Некипелов С.В. 566, 604, 606
- Некоркин С.М. 697, 784, 948, 950, 1061  
 Немцев И.В. 267, 392  
 Ненашев А.В. 1017  
 Несмелов С.Н. 720  
 Нечаев Д.В. 782, 786  
 Нечай А.Н. 521, 531, 533, 537, 562, 568, 570, 580  
 Никируй К.Э. 297, 362  
 Никитенко Ю.В. 68, 220  
 Никитин М.В. 952  
 Никитинский О.С. 185  
 Никитов С.А. 116, 181, 232, 275, 299, 342, 374  
 Никифоров А.И. 1033  
 Николаев В.В. 832  
 Николаев И.Д. 956  
 Николаев С.Н. 230, 362, 802, 838, 871, 954  
 Николенко А.Д. 529, 572, 588, 1029  
 Николичев Д.Е. 271, 380, 754, 780, 804, 877, 1031, 1073  
 Никольская А.А. 852, 958, 1031  
 Никонов А.Е. 362  
 Никонов С.А. 982  
 Никулин Ю.В. 232, 263, 301, 303, 352, 354, 357  
 Никулов А.В. 106  
 Новиков А.В. 673, 697, 830, 903, 974, 1012, 1019, 1021  
 Новиков А.С. 498  
 Новиков П.Л. 812  
 Новиков С.М. 1023  
 Новиков С.Н. 893  
 Новикова К.Н. 459  
 Новикова Н.Н. 914  
 Новицкий Н.Н. 360  
 Носач Е.В. 574  
 Носкова Д.Д. 234, 305, 307  
 Нугуманов А.Г. 396  
 Нургазизов Н.И. 191, 419  
 Нурмухаметов А.Р. 240, 309
- О**
- Оболенская Е.С. 816, 1045  
 Оболенский С.В. 667, 669, 706, 711, 797, 816, 897, 990, 1027, 1045, 1075  
 Образцов А.Н. 905  
 Образцова Е.Д. 1017  
 Обьедков А.М. 432, 604, 606  
 Овсянников Г.А. 261, 269

- Овчаров А.В. 47  
 Овчинников А.В. 710  
 Овчинников А.С. 238  
 Оганнисян Р.А. 475  
 Одинцов С.А. 311, 344  
 Озерин С.А. 434  
 Окишев Р.Ю. 858  
 Окулич В.И. 960  
 Окулич Е.В. 960  
 Омелянчик А.С. 313  
 Онищенко Е.Е. 871, 954  
 Орехова К.Н. 786  
 Орешкин Г.И. 553  
 Орлов В.А. 315, 317, 319, 321  
 Орлова А.Н. 370, 948  
 Орлова И.Н. 315, 317, 319, 321  
 Орлова Н.Н. 962  
 Осин А.С. 108  
 Осинных И.В. 964, 966  
 Осинцева Н.Д. 790  
 Осипов А.В. 695  
 Османов С.В. 291  
 Осотова О.И. 455, 998  
 Островский П.М. 110  
 Охапкин А.И. 968, 1006
- П**
- Павельев Д.Г. 816, 1045  
 Павлов В.Г. 417  
 Павлов Д.А. 682, 948, 958, 1031  
 Павлов О.Н. 461  
 Павлов С.А. 28, 32, 96, 98, 114  
 Павлов С.Г. 1067  
 Павлов С.И. 826  
 Павлова А.Ю. 287  
 Павлова Т.В. 471, 970  
 Павловский В.В. 496, 768  
 Паволоцкий А.Б. 461  
 Памятных Л.А. 323  
 Памятных С.Е. 323  
 Панарин В.А. 912  
 Панина Л.В. 386  
 Панков С.В. 950  
 Панкратов А.Л. 44, 123  
 Панов Ю.Д. 104, 394  
 Панфилов А.С. 1049  
 Паперный В.Л. 453  
 Папроцкий С.К. 680, 972  
 Парафин А.Е. 28, 32, 96, 98, 114, 183, 199, 756  
 Парфенов О.Е. 177  
 Патраков Е.И. 287  
 Патрин Г.С. 315, 317, 325  
 Пахомов А.В. 687  
 Пашенькин И.Ю. 144, 327, 329, 332, 336, 346, 370
- Пашин Д.С. 40, 112  
 Пашин Н.С. 836  
 Пензяков Г.А. 57  
 Перваков К.С. 47, 55, 83, 135  
 Перекалов А.А. 521, 531, 533, 537, 562, 568, 570, 580  
 Перетокин А.В. 974, 1012, 1019, 1021  
 Пермяков Д.В. 459  
 Пермякова О.О. 976  
 Перов А.А. 978  
 Перцов А.А. 557  
 Пестов А.Е. 521, 531, 533, 549, 562, 576, 578, 580, 612, 620, 622  
 Пестов Е.Е. 114  
 Петржик А.М. 261, 269  
 Петров М.И. 1019  
 Петров Ю.В. 216, 473  
 Петрова О.В. 566, 604, 606  
 Петрушков М.О. 665  
 Петухова О.Е. 153  
 Пикунов П.В. 978  
 Пиманов Д.А. 44  
 Пирогов Е.В. 564  
 Писарев Р.В. 334  
 Питиримова Е.А. 756, 1031  
 Пихтин Н.А. 912, 1010  
 Платонов А.В. 860  
 Платонов В.В. 193, 195, 275  
 Плешков Р.С. 531, 562, 582, 584, 612  
 Погосов А.Г. 1069  
 Подгаецкий К.А. 980  
 Подгорная И.А. 734  
 Подгорных С.М. 746, 1081  
 Покровский В.Я. 952, 982  
 Полевой К.Б. 475  
 Ползикова Н.И. 116, 181  
 Полищук О.В. 984  
 Полковников В.Н. 531, 545, 562, 582, 584, 586, 588, 596, 608, 612, 626  
 Половинкин А.В. 376  
 Полуниин И.Н. 706  
 Полушкин Н.И. 327, 329  
 Польшянова М.Р. 455, 998  
 Поляков В.В. 421, 477  
 Пономарев Д.С. 700, 806, 848, 1043  
 Пономарев С.А. 986  
 Попов В.В. 928, 932, 984, 1041
- Попов В.Г. 873, 988  
 Попов М.Р. 153, 746, 1081  
 Попова Е.А. 193  
 Порохов Н.В. 119, 163, 936  
 Потанина Е.А. 630  
 Потехин А.А. 706, 990, 1045  
 Поткина М.Н. 402  
 Пошакинский А.В. 826, 860  
 Преображенский В.В. 665  
 Приходько К.Е. 61, 63  
 Проглядо В.В. 244, 287, 404  
 Прокопенко В.С. 319, 321  
 Протопопов Д.Е. 1055  
 Прошин Ю.Н. 142  
 Пручкина А.А. 871  
 Пугачев М.В. 838  
 Пудалов В.М. 55  
 Пудиков Д.А. 1002  
 Пудонин Ф.А. 305, 307  
 Пузанов А.С. 706, 797, 990, 1027, 1045  
 Пунегов В.И. 590  
 Путилов А.В. 121  
 Пулято М.А. 665  
 Пушкарев С.С. 700, 768, 1043  
 Пьянзина Е.С. 179
- Р**
- Рагозин Е.Н. 574, 555  
 Радищев Д.Б. 738, 887  
 Радовская В.В. 336  
 Раевский А.О. 116, 181  
 Разова А.А. 992  
 Разумов В.Ф. 728  
 Ракицкий М.А. 338  
 Ракшун Я.В. 626  
 Ралин А.Ю. 388  
 Ральченко В.Г. 869, 972  
 Рахлин М.В. 860  
 Ращенко С.В. 626  
 Ревин А.А. 922  
 Ревин Л.С. 100, 123  
 Резник А.Н. 479  
 Резник Р.Р. 832, 994, 1077  
 Ремесник В.Г. 920  
 Ремизов С.В. 67  
 Репин П.Б. 193, 195  
 Реунов Д.Г. 562, 592  
 Роголо Д.И. 806, 986  
 Рогожин А.Е. 976  
 Рогожкина Н.В. 114  
 Родина А.В. 736  
 Родионов Д.А. 801



- Родионов Н.Б. 869, 972  
 Родионова В.В. 313, 344  
 Родионова В.П. 869  
 Родякина Е.Е. 1012  
 Рожанский И.В. 338  
 Розанов Н.Н. 687  
 Романенко Д.В. 283  
 Ромашкина А.М. 295  
 Россоленко А.Н. 74  
 Рошупкин Д.В. 594  
 Рудаков А.О. 996  
 Руденко К.В. 976  
 Руденко Р.Ю. 319, 321  
 Рудин С.А. 812  
 Рудык Н.Н. 455, 998  
 Румянцев В.В. 844, 881, 934, 992, 1000, 1037  
 Рут О.Э. 916  
 Рыбальченко Г.В. 496  
 Рыбин Д.А. 40  
 Рыбин М.Г. 1017  
 Рыбкин А.Г. 340, 1002  
 Рыбкина А.А. 340, 1002  
 Рыжкова М.В. 502  
 Рыльков В.В. 230, 297, 362  
 Рябов М.А. 437  
 Рябоштан Ю.Л. 912  
 Рязанов В.В. 57
- С**  
 Савельев В.В. 1047  
 Савельев Д.В. 384  
 Савенко О.В. 883  
 Савинов Д.А. 28  
 Садовников А.В. 208, 210, 212, 214, 252, 283, 299, 311, 342, 344, 390  
 Саенко А.В. 477  
 Салашенко Н.Н. 521, 531, 533, 537, 560, 562, 568, 570, 578, 596, 620, 628  
 Саломатова Е.И. 344  
 Самарцев А.В. 948  
 Самарцев И.В. 697, 784, 950  
 Саматов М.Р. 125  
 Самохвалов А.А. 598  
 Самохвалов А.В. 127  
 Самусев А.К. 459  
 Сапожников М.В. 295, 327, 329, 332, 346, 436  
 Саранин А.А. 431, 439, 451, 465, 481, 492, 924  
 Сарвадий С.Ю. 434, 443  
 Саркисян А.А. 718  
 Сатанин А.М. 40, 51, 67  
 Сафин А.Р. 299, 374  
 Сафонов А.В. 706  
 Сафонов А.И. 600  
 Сафонов Д.А. 840  
 Сафронов А.П. 265  
 Сахаров В.К. 232, 303, 344, 348, 352, 354, 357  
 Сахин В.О. 1004  
 Сахоненков С.С. 582, 602, 616  
 Свалов А.В. 285, 350  
 Свечников М.В. 545, 582, 584, 586  
 Свиридов Д.Е. 786  
 Седов Е.А. 30  
 Седова И.В. 671  
 Селезнев М.Е. 232, 301, 303, 352, 354, 357  
 Селезнева Е.В. 490  
 Селемир В.Д. 193, 195, 275  
 Селищев С.В. 250  
 Семенов А.В. 36, 38  
 Семенов А.Н. 786  
 Семенов Н.М. 432  
 Семиков Д.А. 1006  
 Сенников П.Г. 814  
 Сергеев А.С. 862  
 Сергеев Ю.А. 710  
 Сергушичев К.А. 598  
 Серокурова А.И. 360  
 Сертеу М.Г. 586  
 Сивков В.Н. 566, 604, 606  
 Сивков Д.В. 566, 604, 606  
 Сидоренко К.В. 780, 708, 1049  
 Сидоров Г.Ю. 720, 836  
 Сизов Ю.Е. 869  
 Синицын В.Е. 238  
 Синченко А.А. 59  
 Ситников А.В. 230, 362  
 Скандаков Р.Н. 566, 604, 606  
 Скворцов И.В. 1033  
 Скирдков П.Н. 400  
 Скоморохов А.М. 1008  
 Скориков М.Л. 891  
 Скороходов Е.В. 289, 291, 332, 370, 482, 830, 903  
 Скрылев А.А. 792, 946  
 Скрыбина О.В. 129, 131  
 Слаутин Б.Н. 484  
 Слипченко С.О. 912, 1010  
 Слышкин А.В. 439  
 Смагина Ж.В. 810, 812, 974, 1012, 1021  
 Смагулова С.А. 676  
 Смертин Р.М. 531, 608  
 Смирнов А.А. 598  
 Смирнов А.М. 1014  
 Смирнов А.Н. 893, 895  
 Смирнов Д.С. 1063  
 Смирнова М.О. 840  
 Соболев К.В. 313  
 Собьянин Д.Н. 856  
 Соколов А. 586  
 Соколов И.С. 177  
 Солдатенков Ф.Ю. 704  
 Солдатенкова М.Д. 38  
 Соловьев А.А. 521, 580  
 Соловьев И.И. 40, 51  
 Солодовник М.С. 1065  
 Соломонов А.В. 551, 610  
 Соломонов Н.А. 459  
 Сорокин С.В. 671  
 Соснов Е.А. 486  
 Сотничук С.В. 281  
 Сохина Е.Т. 137  
 Сошников И.П. 834  
 Спиринов М.Г. 728  
 Ставринидис А. 30  
 Ставринидис Г. 30  
 Стародубцев М.В. 521, 580  
 Степанов А.Н. 710  
 Степина Н.П. 820, 1017  
 Степихова М.В. 974, 1012, 1019, 1021  
 Степушкин М.В. 364  
 Стогний А.И. 212, 275, 348, 360  
 Столяров В.С. 129, 475  
 Сторожевых М.С. 1023  
 Сторчак В.Г. 177  
 Стоякин В.В. 708  
 Стрелков И.С. 193, 195, 275  
 Струля И.Л. 549  
 Студеникин С.А. 1053  
 Ступак М.Ф. 758  
 Субботин И.А. 600  
 Султанов А.Н. 133  
 Султанов О.С. 918  
 Супрун С.П. 836  
 Сурдин О.М. 193, 195, 275  
 Суслин Г.С. 366  
 Суханова Т.Е. 488  
 Сухоруков А.В. 236, 673, 814  
 Сушков А.А. 682
- Т**  
 Таланов Ю.И. 55, 135, 1004  
 Талденков А.Н. 177  
 Таран Д.А. 682  
 Тарасов А.В. 340, 1002  
 Тарасов А.С. 820, 836, 1025  
 Тарасов Е.В. 366

- Тарасов М.А. 137  
Тарасов С.В. 139  
Тарасова Е.А. 990, 1027, 1045  
Тартаковский И.И. 910  
Тархов М.А. 119, 163, 936  
Татарский Д.А. 216, 217, 248, 289, 332, 368, 370, 482  
Тейтельбаум Г.Б. 55, 135, 1004  
Тельшев Д.В. 250  
Темиряев А.Г. 248, 252, 295, 364, 372  
Темиряева М.П. 248, 252, 295, 364, 372  
Темная О.С. 299, 374  
Терешина И.С. 195  
Терешко С.Н. 889  
Терещенко О.Е. 572, 820, 822, 836, 1017, 1025, 1029  
Тертышник А.Д. 1006  
Тетельбаум Д.И. 28, 852, 958, 960, 1031  
Тийс С.А. 463  
Тимонина А.В. 159, 962  
Тимофеев А.А. 840  
Тимофеев В.А. 850, 1033  
Титова А.М. 1035  
Титова Н.А. 36, 38  
Тиходеев С.Г. 742, 766  
Ткаченко И.А. 366  
Товарнов Д.А. 547  
Товстун С.А. 728  
Тогушова Ю.Н. 81  
Токарев В.А. 784  
Токмачев А.М. 177  
Толстихина А.Л. 490  
Торопов А.А. 782, 786  
Торопов А.И. 764, 848  
Торопов М.Н. 521, 562, 612, 614, 622, 624, 626  
Трапезников А.Г. 869  
Тризна А.Д. 38  
Трифонов А.В. 740, 918  
Трошкин А.О. 1037  
Трошков С.И. 671, 782, 786  
Труфанов А.Н. 897  
Трушин В.Н. 535, 1031  
Тузилов А.М. 376  
Туманов В.А. 142  
Тупчая А.Ю. 431, 439, 451, 481, 492, 924  
Турыгин А.П. 415, 494
- У**  
Убийвовк Е.В. 994  
Уваров О.В. 1023
- Удалов О.Г. 378, 436  
Ужаков И.Н. 720, 920  
Уласевич Б.А. 521, 626  
Улин В.П. 704  
Улитко В.А. 104  
Усанов Д.А. 792, 946  
Усилов А.С. 893  
Усикова А.А. 680  
Усманов И.И. 954  
Успенская Л.С. 131  
Уставщиков С.С. 28, 144  
Устищенко Р.В. 718  
Устинов А.В. 102, 166  
Устинов В.В. 244, 287  
Утас О.А. 492  
Утас Т.В. 492, 924  
Уточкин В.В. 881, 934, 1000, 1037  
Ушаков А.Д. 415  
Ушаков Д.В. 691, 693, 768, 948, 1039, 1043
- Ф**  
Фадеев М.А. 934, 1000, 1037  
Фатеев Д.В. 928, 984, 1041  
Фатеева Е.С. 616  
Фахретдинов М.И. 238  
Федина А.Д. 234  
Федонин М.П. 708  
Федосенко Е.В. 820, 836  
Федотов И.А. 380  
Федотов Н.И. 496  
Федулов Ф.А. 382  
Федянин А.Е. 926  
Фельк В.А. 267  
Фетисов Л.Ю. 382, 384  
Фетисов Ю.К. 382  
Фещенко А.А. 350  
Филатов Д.О. 437, 498, 858, 1071  
Филатов Е.В. 910  
Филатова Е.О. 525, 551, 582, 602, 610, 616, 618  
Филимонов Ю.А. 232, 263, 301, 303, 348, 352, 354, 357  
Филиппенко Л.В. 34, 155, 161, 168  
Филиппов А.В. 193, 195  
Филиппов Н.А. 445  
Фильнов С.О. 1002  
Фирсов Д.А. 718  
Фирсов Д.Д. 671, 850, 1051, 1033  
Флоринский И.В. 541  
Фомин Л.А. 258, 500  
Фоминов Я.В. 76, 108, 110
- Фоминский М.Ю. 137, 168  
Фомичев С.А. 713  
Фраерман А.А. 289, 327, 329, 332, 346  
Фролов Н.Ю. 838
- Х**  
Хабибуллин Р.А. 693, 700, 723, 768, 1039, 1043  
Хазанов А.А. 794  
Хазанова С.В. 1027, 1045, 1047, 1049  
Хайбуллин Р. 246  
Хайдуков Ю.Н. 68  
Хаймович И.М. 15, 127  
Хайретдинова Д.Р. 226, 386  
Хан Ф.В. 34, 147  
Харитонский П.В. 388  
Харламов В.А. 708  
Хахулин С.А. 1051  
Хвальковский Н.А. 680, 972  
Хивинцев Ю.В. 232, 303, 348, 352, 354, 357  
Химич С.Г. 271  
Хмельницкий Р.А. 869, 972  
Хомицкий Д.В. 228, 1053  
Хорошилов В.С. 1055  
Хоршев С.К. 114  
Хохлов Д.А. 149  
Хохлов Д.Р. 700, 956  
Храмцов Е.С. 740  
Храпай В.С. 36  
Хрыкин О.И. 689, 726, 968  
Худченко А.В. 49, 147  
Хутиева А.Б. 390  
Хыдырова С. 151
- Ц**  
Царик К.А. 445  
Цуканов Д.А. 502  
Цыбин Н.Н. 521, 523, 531, 533, 560, 580, 612  
Цыплеников В.В. 790, 922, 1057, 1067  
Цырлин Г.Е. 832, 1077  
Цырлин Г.Э. 994
- Ч**  
Чалков В.Ю. 858, 1035  
Чарикова Т.Б. 153  
Чашин Д.В. 382  
Чеканова Л.А. 267, 392  
Чекушкин А.М. 137, 147, 155

- Чен С.М. 201  
 Ченцов С.И. 802, 838, 871  
 Чербунин Р.В. 901  
 Черемных Н.А. 185  
 Черкасов Д. 246  
 Черкова С.Г. 810  
 Черненко А.В. 1059  
 Черненко Н.Е. 1065  
 Чернов В.А. 626  
 Черноглазов К.Ю. 362  
 Чернопицкий М.А. 838, 954  
 Чернышев А.К. 576, 578, 620, 622, 612  
 Честухин В.В. 265  
 Чефонов О.В. 710  
 Чеченин Ю.И. 950  
 Чибирев А.О. 899  
 Чигарев С.Г. 246, 258, 500  
 Чигинев А.В. 44  
 Чигинева А.Б. 784, 948, 950, 1061  
 Чигиринский Ю.И. 708  
 Чиликов А.А. 950  
 Чичков В.И. 102, 166  
 Чопорова Ю.Ю. 790  
 Чуйкин О.А. 157  
 Чукланов А.П. 191, 419  
 Чупраков С. 246  
 Чупрунов Е.В. 535  
 Чучалин В.А. 338  
 Чхало Н.И. 521, 523, 531, 533, 537, 545, 549, 560, 562, 568, 570, 576, 578, 580, 582, 584, 586, 588, 592, 596, 608, 612, 614, 620, 622, 624, 626, 628
- Ш**  
 Шабанов А.В. 267  
 Шабанова О.Г. 267  
 Шабельникова Я.Л. 504  
 Шадрин А.В. 261, 269, 394  
 Шадрин А.М. 307  
 Шамирзаев Т.С. 1063  
 Шандыба Н.А. 1065  
 Шапошников А.Н. 291  
 Шапошников Р.А. 586, 588  
 Шарафуллин И.Ф. 396  
 Шарко С.А. 360  
 Шарков А.И. 838  
 Шаров В.А. 564  
 Шастин В.Н. 790, 842, 922, 1057, 1067  
 Шатохин А.Н. 555, 574  
 Шаферс Ф. 586  
 Шашкин И.С. 1010  
 Шашков И.В. 203, 398  
 Шварц Н.Л. 944  
 Швец В.А. 920  
 Швецов О.О. 159  
 Шевлого В.М. 471, 970  
 Шевченко М.С. 161  
 Шевырин А.А. 1069  
 Шелушнина Н.Г. 153, 746  
 Шенгуров В.Г. 858, 1035  
 Шенгуров Д.В. 1019, 1037  
 Шенина М.Е. 437, 498, 858, 1071  
 Шерешевский И.А. 88, 127  
 Шерман Е.Я. 1053  
 Шерстнев И.А. 305, 307  
 Шерстобитов А.А. 916  
 Шестак Л.И. 912  
 Шестаков Д.В. 792, 946  
 Шибалов М.В. 119, 163, 936  
 Шикин А.М. 1002  
 Шилов А.И. 85  
 Широких Н.С. 1073  
 Шитов С.В. 102, 166  
 Шишкин А.Г. 129  
 Шиян Я.Г. 325  
 Шканакина М.Д. 400  
 Шкляев А.А. 1069  
 Школдин В.А. 459  
 Шмаков В.А. 269  
 Шматов Г.А. 323  
 Шоболов Е.Л. 1075  
 Шоболова Т.А. 1075  
 Штеренталь Д.В. 944  
 Штром И.В. 1077  
 Штыгашев А.А. 133  
 Шуб Б.Р. 434, 443  
 Шубина Т.В. 860, 782, 786, 826  
 Шубина К.Ю. 564  
 Шугаров А.С. 529  
 Шуман И. 76  
 Шумилин А.В. 1063  
 Шуплецов А.В. 838  
 Шур В.Я. 191, 415, 484, 494, 506  
 Шустин М.С. 402  
 Шушунов А.Н. 708, 1049
- Щ**  
 Щеглов Д.В. 986  
 Щеголев А.Е. 40  
 Щелкачев Н.М. 293  
 Щитов А.М. 950
- Э**  
 Эдельман В.С. 137  
 Энтин М.В. 1079
- Ю**  
 Югова И.Ю. 918  
 Юлдашева А.Р. 396  
 Юлдашева Д.К. 728  
 Юнин П.А. 183, 199, 217, 630, 669, 697, 726, 830, 903, 968  
 Юрасов Д.В. 673, 697, 1019, 1021  
 Юрасова Е.В. 547  
 Юртова Л.И. 1049  
 Юрьев В.А. 1023  
 Юсупов А.Р. 457  
 Юсупов Р.А. 168
- Я**  
 Яблоков А.А. 123  
 Яблонский А.Н. 1021  
 Яговкина М.А. 671, 786  
 Яковлев В.А. 914  
 Яковлев Д.Р. 189, 1063  
 Яковлева А.А. 879  
 Яковчук В.Ю. 321, 325  
 Якунин М.В. 746, 1081  
 Якунин С.Н. 600  
 Якунина Е.М. 404  
 Якушев М.В. 720  
 Яминский И.В. 508  
 Ячук В.А. 461

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Материалы XXVI Международного симпозиума**

*Нижний Новгород, 14–17 марта 2022 г.*

*Том 2: секция 3*

В авторской редакции

Институт физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105, Россия  
Тел.: (831) 4179482 +262, (831) 4179476+520, факс: (831) 4179464  
e-mail: symp@nanosymp.ru, Internet: nanosymp.ru

Формат 60×90 1/8.  
Гарнитура «Times». Усл. печ. л. 60,6. Заказ № 609.

Подготовка электронной версии: *М.Л. Тимошенко, В.В. Шеина*

Отдел дизайна РИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37  
Тел. (831) 433-83-25