

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-06-30-38

УДК 621.315.592

# Оптические свойства квантовых точек InGaP(As) в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs

Владислав Васильевич Андрюшкин<sup>1</sup>✉, Иннокентий Игоревич Новиков<sup>2</sup>,  
Андрей Геннадьевич Гладышев<sup>3</sup>, Андрей Владимирович Бабичев<sup>4</sup>,  
Владимир Николаевич Неведомский<sup>5</sup>, Денис Сергеевич Папылев<sup>6</sup>,  
Евгений Сергеевич Колодезный<sup>7</sup>, Леонид Яковлевич Карачинский<sup>8</sup>,  
Антон Юрьевич Егоров<sup>9</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Центр коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях»,  
ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> [vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

<sup>2</sup> [innokenty.novikov@itmo.ru](mailto:innokenty.novikov@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

<sup>3</sup> [andrey.gladyshev@connector-optics.com](mailto:andrey.gladyshev@connector-optics.com)

<https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>

<sup>4</sup> [a.babichev@itmo.ru](mailto:a.babichev@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

<sup>5</sup> [nevedom@mail.ioffe.ru](mailto:nevedom@mail.ioffe.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>

<sup>6</sup> [dspapylev@itmo.ru](mailto:dspapylev@itmo.ru)

<https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>

<sup>7</sup> [evgenii\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgenii_kolodeznyi@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

<sup>8</sup> [leonid.karachinsky@connector-optics.com](mailto:leonid.karachinsky@connector-optics.com)

<https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

<sup>9</sup> [anton.egorov@connector-optics.com](mailto:anton.egorov@connector-optics.com)

<https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

## Аннотация

**Предмет исследования.** Квантовые точки InGaP(As) в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs. **Цель работы.** Установление зависимости длины волны максимума спектра фотолюминесценции полупроводниковых квантовых точек InGaP(As) от расположения квантовых ям InGaAs в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs. **Метод.** Квантовые точки InGaP(As) были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии путём замещения фосфора мышьяком в тонком слое InGaP в процессе эпитаксиального роста. Оптические свойства квантовых точек InGaP(As) исследовались методом спектроскопии фотолюминесценции. **Основные результаты.** Показано, что использование квантовой ямы InGaAs в качестве поверхности формирования трансформируемого в квантовые точки слоя InGaP не оказывает влияния на длину волны максимума спектра фотолюминесценции квантовых точек. При этом при заращивании квантовых точек квантовой ямой InGaAs толщиной 5 нм и с мольной долей InAs 0,17 наблюдается длинноволновый сдвиг спектра фотолюминесценции квантовых точек на величину 56 нм. Поверхностная плотность квантовых точек составила  $1,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты исследования оптических свойств квантовых точек InGaP(As) могут найти своё применение для разработки активной области источников излучения ближнего инфракрасного диапазона.

**Ключевые слова:** квантовые точки, гетероструктуры, молекулярно-пучковая эпитаксия, полупроводники

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

Ссылка для цитирования: Андриюшкин В.В., Новиков И.И., Гладышев А.Г., Бабичев А.В., Неведомский В.Н., Папылев Д.С., Колодезный Е.С., Карачинский Л.Я., Егоров А.Ю. Оптические свойства квантовых точек InGaP(As) в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 6. С. 30–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-30-38>

Коды OCIS: 130.5990, 160.6000, 250.5590.

# Optical properties of InGaP(As) quantum dots in GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs heterostructures

VLADISLAV V. ANDRYUSHKIN<sup>1</sup>✉, INNOKENTY I. NOVIKOV<sup>2</sup>,  
ANDREY G. GLADYSHEV<sup>3</sup>, ANDREY V. BABICHEV<sup>4</sup>,  
VLADIMIR N. NEVEDOMSKY<sup>5</sup>, DENIS S. PAPYLEV<sup>6</sup>,  
EVGENII S. KOLODEZNYI<sup>7</sup>, LEONID YA. KARACHINSKY<sup>8</sup>, ANTON YU. EGOROV<sup>9</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9</sup>ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>5</sup>Joint Research Center “Materials Science and Characterization in Advanced Technology”, Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup>[vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

<sup>2</sup>[innokenty.novikov@itmo.ru](mailto:innokenty.novikov@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

<sup>3</sup>[andrey.gladyshev@connector-optics.com](mailto:andrey.gladyshev@connector-optics.com)

<https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>

<sup>4</sup>[a.babichev@itmo.ru](mailto:a.babichev@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

<sup>5</sup>[nevedom@mail.ioffe.ru](mailto:nevedom@mail.ioffe.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>

<sup>6</sup>[dspapylev@itmo.ru](mailto:dspapylev@itmo.ru)

<https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>

<sup>7</sup>[evgenii\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgenii_kolodeznyi@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

<sup>8</sup>[leonid.karachinsky@connector-optics.com](mailto:leonid.karachinsky@connector-optics.com)

<https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

<sup>9</sup>[anton.egorov@connector-optics.com](mailto:anton.egorov@connector-optics.com)

<https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

## Abstract

**Subject of study.** InGaP(As) quantum dots in GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs heterostructures.

**Aim of study.** Establishing a dependency of the InGaP(As) semiconductor quantum dots maximum photoluminescence spectrum wavelength on the location of InGaAs quantum wells in GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs heterostructures. **Method.** InGaP(As) quantum dots were obtained using molecular beam epitaxy technology by replacing phosphorus with arsenic in a thin InGaP layer during epitaxial growth. The optical properties of InGaP(As) quantum dots were studied by photoluminescence spectroscopy. **Main results.** It is shown that the use of the InGaAs quantum well as the formation surface of the transformed into quantum dots InGaP layer does not affect the wavelength of the maximum photoluminescence spectrum of the quantum dots. At the same time a long-wave shift of the photoluminescence spectrum of quantum dots by 56 nm is observed when the quantum dots are overgrown with 5-nm thick InGaAs quantum well with the molar fraction of InAs 0.17. The surface density of quantum dots was  $1.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . **Practical significance.** The results obtained in the study of the optical properties of InGaP(As) quantum dots will serve as the basis for the development of the active region for near-infrared sources.

**Keywords:** quantum dots, heterostructures, molecular-beam epitaxy, semiconductors

**Acknowledgment:** this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research project № 2019-1442 (project reference number FSER-2020-0013).

**For citation:** Andryushkin V.V., Novikov I.I., Gladyshev A.G., Babichev A.V., Nevedomsky V.N., Papylev D.S., Kolodeznyi E.S., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu. Optical properties of InGaP(As) quantum dots in GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs heterostructures [in Russian] // Opticheskiy Zhurnal. 2024. V. 91. № 6. P. 30–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-30-38>

OCIS codes: 130.5990, 160.6000, 250.5590.

## ВВЕДЕНИЕ

Открытие самоорганизующихся полупроводниковых квантовых точек (КТ), а также исследование их физических свойств, привело к их активному использованию в оптоэлектронных приборах. За последние 30 лет многие мировые исследовательские группы добились значительных успехов в модернизации методов изготовления гетероструктур с КТ для улучшения характеристик полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Одним из наиболее развитых направлений прикладного применения гетероструктур с КТ является использование массивов полупроводниковых КТ в качестве активных областей для источников оптического излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона [1–6]. Область применения источников излучения определяет необходимые параметры итоговых приборов и требования к активным областям на основе КТ. Для традиционных лазерных источников, использующихся в системах передачи данных [7], датчиках различных газов [8] и системах LIDAR [9], предъявляется требование к максимально возможной плотности КТ в активной области на уровне  $10^{11}$  см<sup>-2</sup> и выше. Для источников однофотонного излучения, использующихся в системах квантовой криптографии [10, 11], существует необходимость формирования массива низкоплотных КТ (с поверхностной плотностью не более  $10^{10}$  см<sup>-2</sup> [12, 13]). Использование метода Странски–Крастанова, позволяет формировать КТ InAs/GaAs с поверхностной плотностью порядка  $3 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup> [14]. Для получения низкоплотных КТ может быть использован метод капельной эпитаксии с дополнительным травлением поверхности и последующего осаждения индия в сформированные области [15]. Однако в рассмотренных методах присутствует ряд недостатков, таких как низкое оптическое усиление и температурная чувствительность за счёт наличия смачивающего слоя в методе Странски–Крастанова [16], а также необходимость дополнительной подготовки подложки для получения низкой поверхностной плотности КТ в методе капельной эпитаксии [15]. Отдельной задачей является реализация заданной длины волны излучения при сохранении заданной поверхностной плотности КТ. Для этого используются подходы, позволяющие управлять спектральным диапазо-

ном излучения, например, вставка дополнительных квантовых ям (КЯ) в конструкцию гетероструктуры активной области на основе КТ [17]. Ранее в работах [18, 19] нами была продемонстрирована возможность получения полупроводниковых КТ InGaP(As) спектрального диапазона 0,95–1 мкм в процессе замещения элементов пятой группы, а именно фосфора на мышьяк, в тонком слое фосфида индия галлия в процессе эпитаксиального роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Целью данной работы является установление зависимости длины волны максимума спектра фотолюминесценции полупроводниковых квантовых точек InGaP(As) от расположения квантовых ям In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As толщиной 5 нм в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Все гетероструктуры изготовлены методом МПЭ с использованием полупромышленной установки Riber 49. Для изготовления полупроводниковых гетероструктур использовались полуизолирующие подложки арсенида галлия диаметром 3 дюйма. Базовая конструкция гетероструктуры представляла собой последовательно расположенные на подложке полупроводниковые слои: буферный слой GaAs, первый барьерный слой AlGaAs, первый слой обкладки GaAs, трансформируемый в КТ и согласованный по параметру кристаллической решётки с подложкой GaAs слой InGaP, второй слой обкладки GaAs, второй барьерный слой AlGaAs, прикрывающий слой GaAs. Толщина барьерных слоёв и слоёв обкладки составляла 100 нм, толщина трансформируемого слоя InGaP составляла 2 нм, толщина прикрывающего слоя, используемого для предотвращения окисления, составляла 5 нм. Процесс формирования КТ InGaP(As) с использованием базовой конструкции подробно описан в опубликованной ранее работе [18].

В настоящей работе для анализа влияния интеграции КЯ InGaAs толщиной 5 нм в базовую конструкцию гетероструктуры GaAs/AlGaAs/InGaP(As) была изготовлена серия образцов (QD1–QD4), отличающихся наличием и местом расположения КЯ In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As

GaAs 5 нм	Образец	Слой № 1	Слой № 2
AlGaAs 100 нм			
GaAs 100 нм	QD1	–	–
Слой № 1			
Квантовые точки InGaP(As)	QD2	In <sub>0,17</sub> Ga <sub>0,83</sub> As 5 нм	–
Слой № 2			
GaAs 100 нм	QD3	–	In <sub>0,17</sub> Ga <sub>0,83</sub> As 5 нм
AlGaAs 100 нм			
GaAs 100 нм	QD4	In <sub>0,17</sub> Ga <sub>0,83</sub> As 5 нм	In <sub>0,17</sub> Ga <sub>0,83</sub> As 5 нм
Sl GaAs (100)			

Рис. 1. Схематическое изображение конструкций гетероструктур (QD1–QD4)

Fig. 1. Schematic representation of QD1–QD4 heterostructures design

в конструкции гетероструктуры. Интеграция КЯ In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As в базовую конструкцию (гетероструктура QD1) производилась в трёх вариантах. В первом варианте происходила интеграция КЯ In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As в качестве прикрывающего КТ InGaP(As) слоя (гетероструктура QD2). Во втором варианте КЯ In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As использовалась как поверхность, на которой происходит эпитаксиальный рост трансформируемого слоя InGaP (гетероструктура QD3). В третьем варианте происходило объединение первых двух и изготавливался, так называемый, матричный слой In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As, состоящий из двух КЯ, в котором формировались КТ InGaP(As) (гетероструктура QD4). Конструкции гетероструктур представлены на рис. 1.

Отдельно, для анализа поверхностной плотности и геометрических размеров КТ методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) была изготовлена гетероструктура ТЕМ1. Отличительной особенностью данной гетероструктуры от базовой являлась замена всех последующих после формирования квантовых точек InGaP(As) слоёв на прикрывающий слой GaAs толщиной 25 нм.

Температура подложки во время эпитаксиального роста для всех гетероструктур, исследуемых в данной работе, составляла 580 °С, при этом для трансформируемого слоя InGaP, а также прикрывающего его слоя толщиной 5 нм, температура роста снижалась до 520 °С. Время замещения потока фосфора на поток мышьяка составляло 30 с. Время выдержки

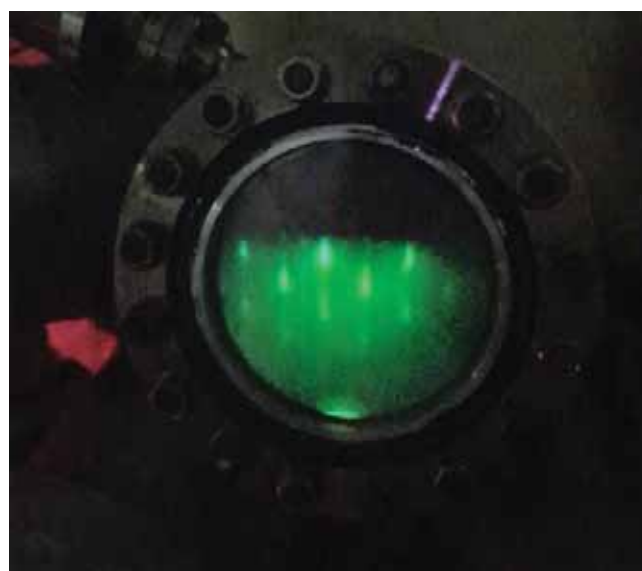


Рис. 2. Картина дифракции отражения быстрых электронов, наблюдаемая в процессе формирования КТ InGaP(As)

Fig. 2. High energy electron diffraction pattern observed during the InGaP(As) quantum dots formation

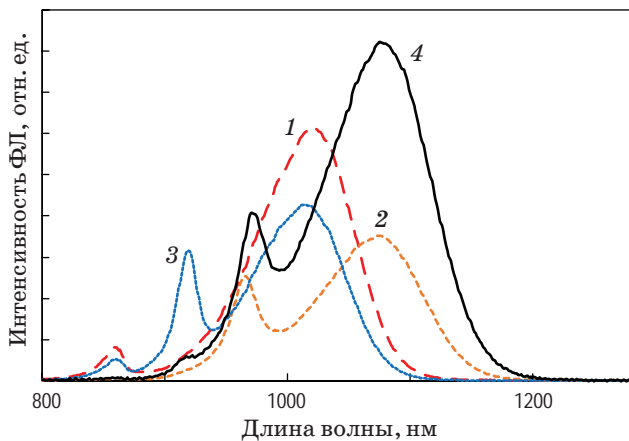
трансформируемого слоя InGaP в потоке мышьяка составляло 5 мин. Контроль формирования КТ производился с использованием системы дифракции отражения быстрых электронов, интегрированной в установку МПЭ. На люминесцентном экране наблюдались характерные для формирования трёхмерных объектов уширения линейных рефлексов во время отражения электронного пучка от ростовой

поверхности в процессе выдержки трансформируемого слоя InGaP в потоке мышьяка (рис. 2).

Исследование гетероструктур методом фотolumинесценции (ФЛ) при комнатной температуре производилось в центре полупроводниковых пластин с использованием установки Nanometrics RPM 2000, оснащённой YAG: Nd-лазером с длиной волны излучения 532 нм. Оптическая мощность лазера составляла 45 мВт. Исследования структурных свойств гетероструктур методом ПЭМ были выполнены с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) на микроскопе JEM-2100F.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

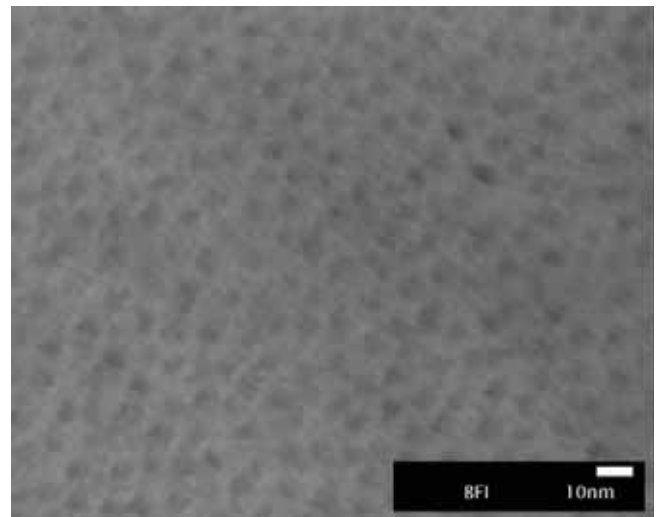
Спектры ФЛ гетероструктур QD1–QD4 представлены на рис. 3. Согласно полученным данным максимум спектра ФЛ массива КТ лежит в диапазоне 1027–1087 нм в зависимости от расположения КЯ In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As в конструкции гетероструктуры. Для гетероструктур QD1 и QD2 наблюдается длинноволновый сдвиг максимума спектра ФЛ КТ InGaP(As) на 56 нм, связанный с наличием прикрывающего КТ слоя In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As, максимум спектра ФЛ



**Рис. 3.** Спектры ФЛ гетероструктур QD1 (1), QD2 (2), QD3 (3), QD4 (4), полученные при комнатной температуре. Пик спектра ФЛ КТ InGaP(As): QD1 — 1028 нм, QD2 — 1084 нм, QD3 — 1027 нм, QD4 — 1087 нм

**Fig. 3.** PL spectra of QD1 (1), QD2 (2), QD3 (3), QD4 (4) heterostructures measured at room temperature. QD InGaP(As) PL peaks: QD1 — 1028 nm, QD2 — 1084 nm, QD3 — 1027 nm, QD4 — 1087 nm

которого лежит в области 978 нм. Основываясь на результатах сравнения гетероструктур QD1 и QD3 можно сделать вывод об отсутствии влияния на длину волны максимума спектра ФЛ массива КТ слоя In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As, используемого в качестве поверхности осаждения слоя InGaP. Данный эффект является нетипичным для КТ системы материалов A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>. Согласно литературным данным [17], использование КЯ в конструкции гетероструктур как до формирования КТ, так и после, оказывает аналогичное влияние на сдвиг положения максимума спектра ФЛ в длинноволновую область. Полученный результат можно связать с частичным преобразованием верхнего слоя КЯ InGaAs толщиной 1–2 нм в слой InGaAsP во время перестройки атмосферы в ростовой камере с мышьяковой на фосфорную перед осаждением слоя InGaP. Таким образом, уменьшается толщина КЯ InGaAs и её основной уровень смещается в область больших энергий, что подтверждается данными по исследованию ФЛ. Из верхних слоёв КЯ формируется потенциальный барьер, а постоянная кристаллической решётки уменьшается, приводя к частичной и/или полной компенсации упругих напряжений от КЯ, то есть формируется два упруго-компенсированных тонких слоя InGaAs и InGaAsP. Данные факторы приводят к тому, что упругие напряжения



**Рис. 4.** ПЭМ-изображение планарной поверхности гетероструктуры TEM1 (001) в сканирующем режиме

**Fig. 4.** TEM image of TEM1 (001) sample surface in scanning mode

от КЯ InGaAs не влияют на положение максимума спектра ФЛ.

Сравнение спектров ФЛ гетероструктур QD2 и QD4 также подтверждает сделанный вывод об отсутствии влияния КЯ In<sub>0,17</sub>Ga<sub>0,83</sub>As на длину волны излучения КТ InGaP(As) при их использовании в качестве поверхности формирования трансформируемого слоя InGaP. Максимумы спектров ФЛ массива КТ сопоставимы, при этом гетероструктура QD4 включает в себя матричный слой InGaAs с максимумами спектров ФЛ 924 и 978 нм, в отличие от гетероструктуры QD2 с одной КЯ в качестве прикрывающего КТ слоя. Интенсивность ФЛ КТ InGaP(As) в гетероструктуре QD4 из всех рассматриваемых образцов максимальна.

Согласно ранее опубликованным данным [20–23] для известных КТ системы материалов А<sub>3</sub>В<sub>5</sub>, полученных методом МПЭ, с высоким уровнем однородности массива КТ по размерам и составу, ширина пика спектра ФЛ КТ, измеренная на полувысоте (FWHM), составляет величину от 20 до 50 мэВ. В исследуемых в данной работе гетероструктурах величина FWHM составила 68–88 мэВ в зависимости от конструкции гетероструктуры, что говорит о разбросе массива КТ InGaP(As) по размерам и/или составу.

Для анализа поверхностной плотности и латеральных размеров КТ InGaP(As) методом ПЭМ была исследована гетероструктура TEM1. Оценка поверхностной плотности КТ InGaP(As) составила  $1,3 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, а их латеральные размеры составили 5–7 нм. Согласно данным ПЭМ массив КТ имеет малый разброс по размеру, в отличие от КТ, полученных нами ранее [18], латеральные размеры которых составляли 5–10 нм в направлении (–1–10) и

10–80 нм в направлении (1–10), а поверхностная плотность составляла около  $1,3 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Данный факт позволяет сделать вывод, основываясь на полученных в данной работе результатах ФЛ и ПЭМ, что значительный вклад в параметр FWHM вносит разброс по составу, а именно мольной доли мышьяка и фосфора при замещении элементов пятой группы во время формирования КТ InGaP(As).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние расположения КЯ InGaAs в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs на спектр фотолюминесценции полупроводниковых КТ InGaP(As), полученных путём замещения фосфора мышьяком в тонком слое InGaP в процессе эпитаксиального роста методом МПЭ.

Показано, что использование КЯ толщиной 5 нм и с мольной долей InAs 0,17 в качестве поверхности осаждения трансформируемого слоя InGaP не оказывает влияния на длину волны максимума спектра ФЛ КТ, что связано с компенсацией упругих напряжений в слоях InGaP и InGaAsP. Использование КЯ InGaAs в качестве прикрывающего КТ слоя приводит к длинноволновому сдвигу максимума спектра ФЛ КТ InGaP(As) на 56 нм.

Исследования структурных свойств КТ методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что поверхностная плотность КТ составила около  $1,3 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. При этом латеральные размеры КТ составляют 5–7 нм. Согласно полученным данным значительное влияние на ширину спектра ФЛ оказывает разброс по составу КТ, а именно атомов пятой группы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Егоров А.Ю. и др. Оптические свойства гетероструктур с квантовыми кластерами InGaAs–GaAs // Физика и техника полупроводников. 1994. Т. 28. № 8. С. 1483–1487.
2. Жуков А.Е., Егоров А.Ю., Ковш А.Р. и др. Инжекционный гетеролазер на основе массива вертикально совмещенных квантовых точек InGaAs в матрице AlGaAs // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 4. С. 483–487.
3. Малеев Н.А., Жуков А.Е., Ковш А.Р. и др. Гетероструктуры с несколькими слоями InAs/InGaAs-квантовых точек для источников оптического излучения диапазона длин волн 1,3 мкм // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. № 5. С. 612–616.

## REFERENCES

1. Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Egorov A.Y. et al. Optical properties of heterostructures with InGaAs–GaAs quantum clusters // Semiconductors. 1994. V. 28. № 8. P. 832–834.
2. Zhukov A.E., Egorov A.Y., Kovsh A.R. et al. Injection heterolaser based on an array of vertically aligned InGaAs quantum dots in a AlGaAs matrix // Semiconductors. 1997. V. 31. P. 411–414. <https://doi.org/10.1134/1.1187173>
3. Maleev N.A., Zhukov A.E., Kovsh A.R. et al. Stacked InAs/InGaAs quantum dot heterostructures for optical sources emitting in the 1.3 μm wavelength range // Semiconductors. 2000. V. 34. № 5. P. 594–597. <https://doi.org/10.1134/1.1188034>

4. Цырлин Г.Э., Петров В.Н., Масалов С.А. и др. Самоорганизация квантовых точек в многослойных структурах InAs/GaAs и InGaAs/GaAs при субмонослойной эпитаксии // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. № 6. С. 733–737.
5. Karachinsky L.Y., Kettler T., Gordeev N.Y. et al. High-power singlemode CW operation of 1.5  $\mu\text{m}$ -range quantum dot GaAs-based laser // Electron. Lett. 2005. V. 41. № 8. P. 478–480. <https://doi.org/10.1049/el:20050536>
6. Ledentsov N.N., Shchukin V.A., Kettler T. et al. MBE-grown metamorphic lasers for applications at telecom wavelengths // J. Cryst. Growth. 2007. V. 301. P. 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.09.035>
7. Haglund E.P., Kumari S., Haglund E. Silicon-integrated hybrid-cavity 850-nm VCSELs by adhesive bonding: Impact of bonding interface thickness on laser performance // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2017. V. 23. № 6. P. 1700109. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2633823>
8. Kakuma S., Noda K. Practical and sensitive measurement of methane gas concentration using a 1.6  $\mu\text{m}$  vertical-cavity-surface-emitting-laser diode // Sens. Mater. 2010. V. 22. № 7. P. 365–375.
9. Rablau C. LIDAR — A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences // Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019. Quebec, Canada. May 21–24, 2019. P. 111430C-1–111430C-14. <https://doi.org/10.1117/12.2523863>
10. Schimpf C., Reindl M., Huber D. et al. Quantum cryptography with highly entangled photons from semiconductor quantum dots // Sci. adv. 2021. V. 7. № 16. P. eabe8905. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe8905>
11. Bozzio M., Vyvlecka M., Cosacchi M. et al. Enhancing quantum cryptography with quantum dot single-photon sources // npj Quantum Inf. 2022. V. 8. № 1. P. 104. <https://doi.org/10.1038/s41534-022-00626-z>
12. Michler P. Single semiconductor quantum dots. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 389 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87446-1>
13. Schlottmann E., Schicke D., Kruger F. et al. Stochastic polarization switching induced by optical injection in bimodal quantum-dot micropillar lasers // Opt. Express. 2019. V. 27. № 20. P. 28816–28831. <https://doi.org/10.1364/oe.27.028816>
14. Tang X., Yin Z., Zhao J. et al. A new method of two-step growth of InAs/GaAs quantum dots with higher density and more size uniformity // Nanotechnol. 2005. V. 17. № 1. P. 295–299. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/1/050>
15. Kim J.S., Kawabe M., Koguchi N. Ordering of high-quality InAs quantum dots on defect-free nanoholes // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 7. P. 072107-1–072107-3. <https://doi.org/10.1063/1.2174097>
16. Colombo D., Sanguinetti S., Grilli E. et al. Efficient room temperature carrier trapping in quantum dots by tailoring the wetting layer // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 10. P. 6513–6517. <https://doi.org/10.1063/1.1622775>
17. Крыжановская Н.В., Гладышев А.Г., Блохин С.А. и др. Оптические и структурные свойства массивов квантовых точек InAs, осажденных в матрицу  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на подложке GaAs // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 7. С. 867–871.
4. Tsyrlin G.E., Petrov V.N., Masalov S.A. et al. Self-organization of quantum dots in multilayer InAs/GaAs and InGaAs/GaAs structures in submonolayer epitaxy // Semiconductors. 1999. V. 33. P. 677–680. <https://doi.org/10.1134/1.1187755>
5. Karachinsky L.Y., Kettler T., Gordeev N.Y. et al. High-power singlemode CW operation of 1.5  $\mu\text{m}$ -range quantum dot GaAs-based laser // Electron. Lett. 2005. V. 41. № 8. P. 478–480. <https://doi.org/10.1049/el:20050536>
6. Ledentsov N.N., Shchukin V.A., Kettler T. et al. MBE-grown metamorphic lasers for applications at telecom wavelengths // J. Cryst. Growth. 2007. V. 301. P. 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.09.035>
7. Haglund E.P., Kumari S., Haglund E. Silicon-integrated hybrid-cavity 850-nm VCSELs by adhesive bonding: Impact of bonding interface thickness on laser performance // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2017. V. 23. № 6. P.1700109. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2633823>
8. Kakuma S., Noda K. Practical and sensitive measurement of methane gas concentration using a 1.6  $\mu\text{m}$  vertical-cavity-surface-emitting-laser diode // Sens. Mater. 2010. V. 22. № 7. P. 365–375.
9. Rablau C. LIDAR — A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences // Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019. Quebec, Canada. May 21–24, 2019. P.111430C-1–111430C-14. <https://doi.org/10.1117/12.2523863>
10. Schimpf C., Reindl M., Huber D. et al. Quantum cryptography with highly entangled photons from semiconductor quantum dots // Sci. adv. 2021. V. 7. № 16. P. eabe8905. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe8905>
11. Bozzio M., Vyvlecka M., Cosacchi M. et al. Enhancing quantum cryptography with quantum dot single-photon sources // npj Quantum Inf. 2022. V. 8. № 1. P. 104. <https://doi.org/10.1038/s41534-022-00626-z>
12. Michler P. Single semiconductor quantum dots. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 389 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87446-1>
13. Schlottmann E., Schicke D., Kruger F. et al. Stochastic polarization switching induced by optical injection in bimodal quantum-dot micropillar lasers // Opt. Express. 2019. V. 27. № 20. P. 28816–28831. <https://doi.org/10.1364/oe.27.028816>
14. Tang X., Yin Z., Zhao J. et al. A new method of two-step growth of InAs/GaAs quantum dots with higher density and more size uniformity // Nanotechnol. 2005. V. 17. № 1. P. 295–299. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/1/050>
15. Kim J.S., Kawabe M., Koguchi N. Ordering of high-quality InAs quantum dots on defect-free nanoholes // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 7. P. 072107-1–072107-3. <https://doi.org/10.1063/1.2174097>
16. Colombo D., Sanguinetti S., Grilli E. et al. Efficient room temperature carrier trapping in quantum dots by tailoring the wetting layer // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 10. P. 6513–6517. <https://doi.org/10.1063/1.1622775>
17. Kryzhanovskaya N.V., Gladyshev A.G., Blokhin S.A. et al. Optical and structural properties of InAs quantum dot arrays grown in an  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  matrix on a GaAs substrate // Semiconductors. 2004. V. 38. P. 833–836. <https://doi.org/10.1134/1.1777610>

18. Гладышев А.Г., Бабичев А.В., Андриюшкин В.В. и др. Исследование оптических и структурных свойств трехмерных островков InGaP(As), сформированных методом замещения элементов пятой группы // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 12. С. 2139–2142. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.12.50133.129-20>
19. Крыжановская Н.В., Драгунова А.С., Комаров С.Д., и др. Оптические свойства трехмерных островков InGaP (As), сформированных методом замещения элементов пятой группы // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 2. С. 218–222. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.02.50561.263-20>
20. Mantri M.R., Panda D., Gazi S.A. et al. Impact of growth rate variabilities of quantum dots and capping layer on photoluminescence of epitaxially grown InAs quantum dots // Proc. SPIE 11291. Quantum Dots, Nanostructures, and Quantum Materials: Growth, Characterization, and Modeling XVII. 2020. V. 11291. P. 8–14. <https://doi.org/10.1117/12.2547134>
21. Yuan Q., Liang B., Zhou C. et al. Interplay effect of temperature and excitation intensity on the photoluminescence characteristics of InGaAs/GaAs surface quantum dots // Nanoscale Res. Lett. 2018. V. 13. P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2792-y>
22. Mirin R.P., Ibbetson J.P., Nishi K. et al. 1.3  $\mu\text{m}$  photoluminescence from InGaAs quantum dots on GaAs // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 25. P. 3795–3797. <https://doi.org/10.1063/1.115386>
23. Liu X., Liu J., Liang B. et al. Type-II characteristics of photoluminescence from InGaAs/GaAs surface quantum dots due to Fermi level pinning effect // Appl. Surf. Sci. 2022. V. 578. P. 152066. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152066>
18. Gladyshev A.G., Babichev A.V., Andryushkin V.V. et al. Studying the optical and structural properties of three-dimensional InGaP (As) islands formed by substitution of elements of the fifth group // Technical Physics. 2020. V. 65. P. 2047–2050. <https://doi.org/10.1134/S1063784220120099>
19. Kryzhanovskaya N.V., Dragunova A.S., Komarov S.D. et al. Optical properties of three-dimensional InGaP (As) islands formed by substitution of fifth-group elements // Optics and Spectroscopy. 2021. V. 129. P. 256–260. <https://doi.org/10.1134/S0030400X21020089>
20. Mantri M.R., Panda D., Gazi S.A. et al. Impact of growth rate variabilities of quantum dots and capping layer on photoluminescence of epitaxially grown InAs quantum dots // Proc. SPIE 11291. Quantum Dots, Nanostructures, and Quantum Materials: Growth, Characterization, and Modeling XVII. 2020. V. 11291. P. 8–14. <https://doi.org/10.1117/12.2547134>
21. Yuan Q., Liang B., Zhou C. et al. Interplay effect of temperature and excitation intensity on the photoluminescence characteristics of InGaAs/GaAs surface quantum dots // Nanoscale Res. Lett. 2018. V. 13. P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2792-y>
22. Mirin R.P., Ibbetson J.P., Nishi K. et al. 1.3  $\mu\text{m}$  photoluminescence from InGaAs quantum dots on GaAs // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 25. P. 3795–3797. <https://doi.org/10.1063/1.115386>
23. Liu X., Liu J., Liang B. et al. Type-II characteristics of photoluminescence from InGaAs/GaAs surface quantum dots due to Fermi level pinning effect // Appl. Surf. Sci. 2022. V. 578. P. 152066. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152066>

## АВТОРЫ

**Владислав Васильевич Андриюшкин** — канд. техн. наук, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57209329441; <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>; [vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru)

**Инокентий Игоревич Новиков** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7202658480; <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>; [innokenty.novikov@itmo.ru](mailto:innokenty.novikov@itmo.ru)

**Андрей Геннадьевич Гладышев** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6701588481; <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>; [andrey.gladyshev@connector-optics.com](mailto:andrey.gladyshev@connector-optics.com)

**Андрей Владимирович Бабичев** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56819964000; <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>; [a.babichev@itmo.ru](mailto:a.babichev@itmo.ru)

**Владимир Николаевич Неvedомский** — старший научный сотрудник, Центр коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», 194021, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57202304754; <https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>; [nevedom@mail.ioffe.ru](mailto:nevedom@mail.ioffe.ru)

**Денис Сергеевич Папылев** — аспирант, инженер-исследователь, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>; [dspapylev@itmo.ru](mailto:dspapylev@itmo.ru)

## AUTHORS

**Vladislav V. Andryushkin** — PhD, Junior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57209329441; <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>; [vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru)

**Innokenty I. Novikov** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 7202658480; <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>; [innokenty.novikov@itmo.ru](mailto:innokenty.novikov@itmo.ru)

**Andrey G. Gladyshev** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6701588481; <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>; [andrey.gladyshev@connector-optics.com](mailto:andrey.gladyshev@connector-optics.com)

**Andrey V. Babichev** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56819964000; <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>; [a.babichev@itmo.ru](mailto:a.babichev@itmo.ru)

**Vladimir N. Nevedomsky** — Senior Researcher, Joint Research Center «Materials science and characterization in advanced technology», 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57202304754; <https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>; [nevedom@mail.ioffe.ru](mailto:nevedom@mail.ioffe.ru)

**Denis S. Papylev** — PhD Student, Engineer Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>; [dspapylev@itmo.ru](mailto:dspapylev@itmo.ru)

**Евгений Сергеевич Колодезный** — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56520395600; <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>; [evgenii\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgenii_kolodeznyi@itmo.ru)

**Леонид Яковлевич Карачинский** — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6603558355; <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>; [lkarachinsky@itmo.ru](mailto:lkarachinsky@itmo.ru)

**Антон Юрьевич Егоров** — член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7202362169; <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>; [anton.egorov@connector-optics.com](mailto:anton.egorov@connector-optics.com)

**Evgenii S. Kolodeznyi** — PhD in Physics and Mathematics, Head of Laboratory, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56520395600; <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>; [evgenii\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgenii_kolodeznyi@itmo.ru)

**Leonid Ya. Karachinsky** — Doctor of Science, Leading Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6603558355; <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>; [lkarachinsky@itmo.ru](mailto:lkarachinsky@itmo.ru)

**Anton Yu. Egorov** — Corresponding Member of the RAS, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 7202362169; <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>; [anton.egorov@connector-optics.com](mailto:anton.egorov@connector-optics.com)

*Статья поступила в редакцию 05.03.2024  
Одобрена после рецензирования 03.04.2024  
Принята к печати 29.04.2024*

*The article was submitted to the editorial office 05.03.2024  
Approved after review 03.04.2024  
Accepted for publication 29.04.2024*