

# Влияние химического состава окружающих слоев на оптические свойства квантовых точек InGaP(As)

© В.В. Андриушкин<sup>1</sup>, И.И. Новиков<sup>1</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1</sup>, А.В. Бабичев<sup>1</sup>, В.Н. Неведомский<sup>2</sup>,  
Д.С. Папылев<sup>1</sup>, Е.С. Колодезный<sup>1</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1</sup>, А.Ю. Егоров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ООО „Коннектор Оптик“,  
194292 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vvandriushkin@itmo.ru

Поступила в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 30 июля 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты исследования влияния расположения и химического состава квантовых ям InGaAs в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs на оптические свойства квантовых точек InGaP(As), полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии за счет замещения фосфора мышьяком в слое InGaP в процессе эпитаксиального роста. Показано, что длинноволновый сдвиг максимума фотолюминесценции массива квантовых точек наблюдается при использовании квантовой ямы InGaAs в качестве покрывающего слоя, однако, использование квантовой ямы InGaAs в качестве поверхности формирования квантовых точек InGaP(As) не приводит к сдвигу длины волны максимума фотолюминесценции. Увеличение мольной доли InAs в покрывающем слое InGaAs с 0.17 до 0.23 приводит к длинноволновому сдвигу максимума спектра фотолюминесценции массива квантовых точек на 108 нм.

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

DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59373.6448A

## 1. Введение

Наноразмерные полупроводниковые объекты позволяют значительно улучшить характеристики источников излучения за счет эффекта квантования. Одним из наиболее развитых направлений прикладного применения квантовых точек (КТ) является использование массивов полупроводниковых КТ в качестве активных областей для источников оптического излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона [1–5]. Ранее в работе [6] нами был предложен метод получения полупроводниковых КТ InGaP(As) спектрального диапазона 1 мкм, полученных путем замещения фосфора мышьяком в полупроводниковом слое InGaP в процессе эпитаксиального роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

В настоящей работе исследовано влияние мольной доли InAs в слое InGaAs, используемом в качестве поверхности осаждения и покрывающего слоя, на оптические свойства КТ InGaP(As).

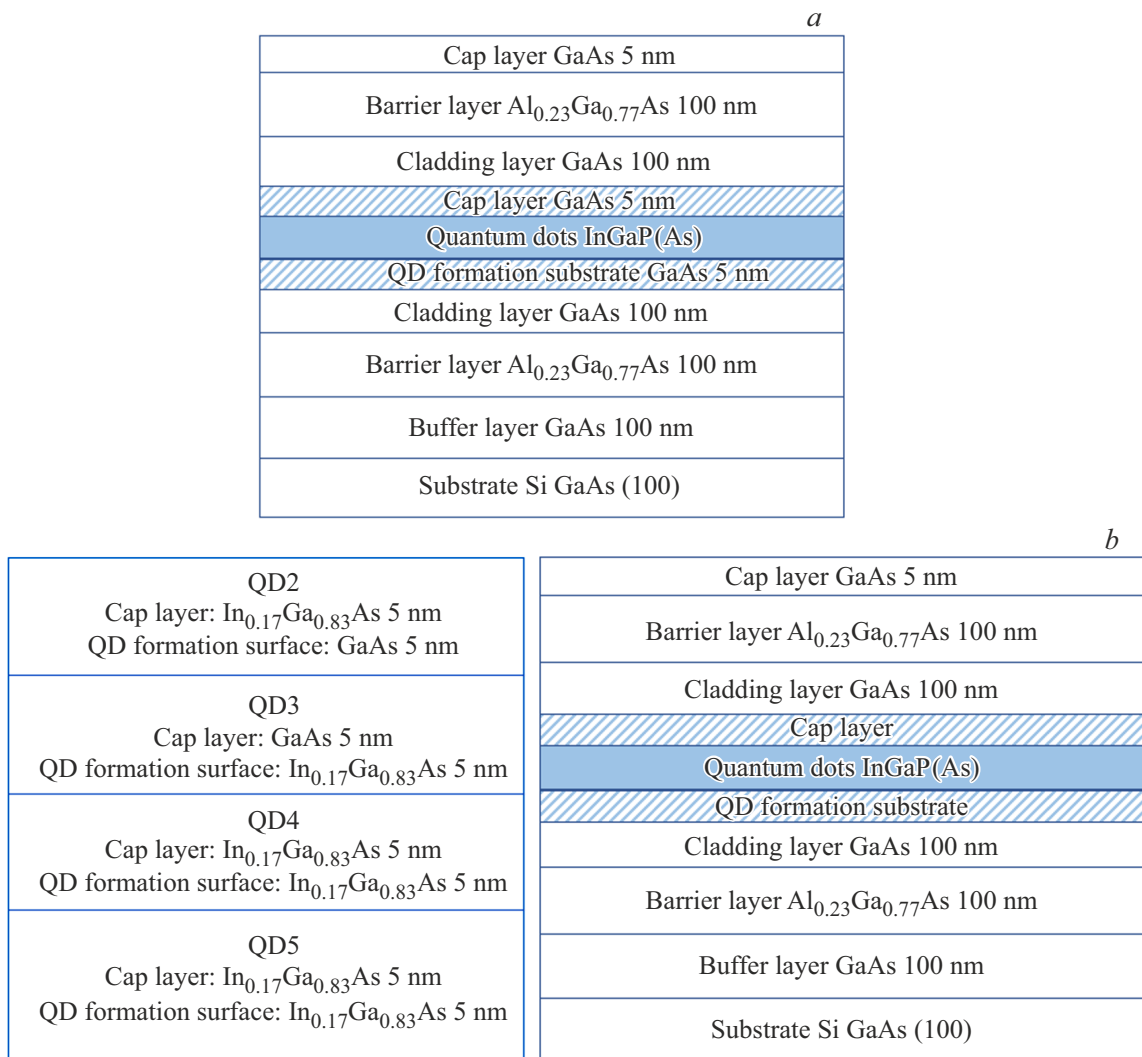
## 2. Материалы и методы

Гетероструктуры для исследований были изготовлены методом МПЭ на полуизолирующих подложках GaAs(100) с использованием установки Riber49 (Франция). Было изготовлено пять гетероструктур (QD1–QD5), отличающихся наличием и расположением квантовой ямы (КЯ) в конструкции гетероструктуры,

а также мольной долей InAs в составе КЯ. Базовая конструкция гетероструктуры (QD1), отличающаяся отсутствием в своей конструкции КЯ, с указанием толщин и мольной доли материалов в тройных растворах представлена на рис. 1, а. Трансформируемый в массив КТ полупроводниковый слой InGaP, согласованный по параметру кристаллической решетки с подложкой, обладал толщиной 2 нм. Детально процесс формирования КТ InGaP(As) путем замещения фосфора мышьяком подробно описан в ранее опубликованной нами работе [6].

Исследуемые в данной работе гетероструктуры изготовлены при ростовой температуре 580°C. Трансформируемый слой InGaP, а также покрывающий его слой толщиной 5 нм осаждались при температуре 520°C. Время замещения потоков материалов V группы и поддержки гетероструктуры в потоке мышьяка суммарно составляло 5 мин. Использовались два источника Ga: первый — для формирования слоя InGaP (скорость осаждения 0.2 МС/с), второй — для оставшихся Ga-содержащих слоев (скорость осаждения 0.6 МС/с). Отношение потоков материалов III группы к материалам V группы поддерживалось 1:10 во время всего ростового процесса.

Была изготовлена серия гетероструктур QD2–QD5 с добавленными в базовую конструкцию QD1 КЯ InGaAs толщиной 5 нм. Для гетероструктур QD2 и QD3 использовался один слой с КЯ In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As, отличающийся своим расположением в конструкции гетероструктуры.



**Рис. 1.** Схематическое представление конструкций базовой гетероструктуры QD1 (*a*) и гетероструктур с КЯ InGaAs QD2–QD5 (*b*).

Для гетероструктур QD4 и QD5 использовался матричный слой InGaAs, отличающийся мольной долей InAs в своем составе. Схематическое представление конструкции гетероструктур QD2–QD5 представлено на рис. 1, *b*.

Для анализа поверхностной плотности и геометрических размеров КТ методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) была изготовлена отдельная гетероструктура TEM1, которая являлась аналогом QD1, но слой с КТ InGaP(As) в ней находился практически на поверхности и был покрыт только слоем GaAs толщиной 25 нм.

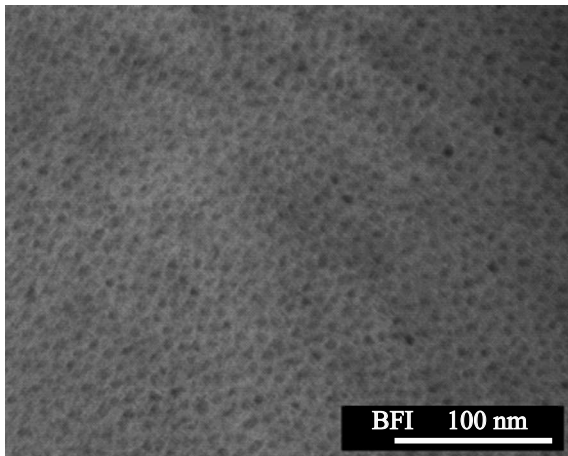
Гетероструктуры были исследованы методом фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре на установке RPM2000 Nanometrics. Возбуждение ФЛ производилось Nd:YAG-лазером с длиной волны излучения 532 нм и мощностью излучения 45 мВт. Электронно-микроскопические исследования были выполнены с использованием оборудования ЦКП „Материаловед-

ние и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) на микроскопе JEM-2100F в сканирующем режиме.

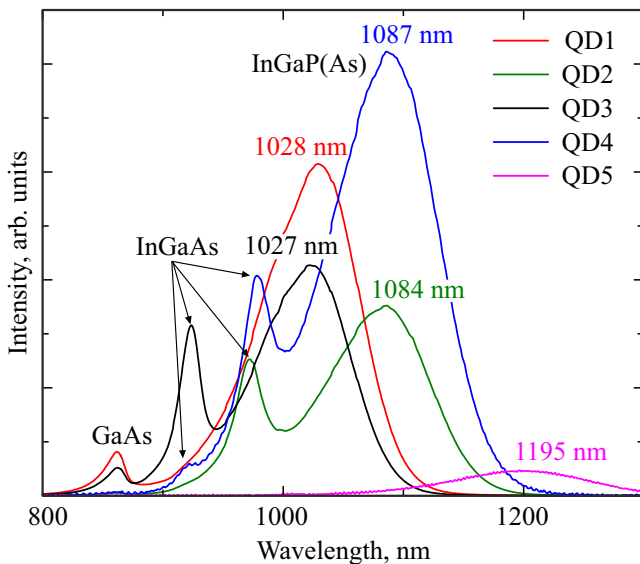
### 3. Результаты и обсуждение

Исследования методом ПЭМ гетероструктуры TEM1 (рис. 2) показали, что массив КТ InGaP(As), полученный при данных ростовых условиях, обладает поверхностной плотностью  $1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . При этом КТ обладают высоким уровнем однородности по размеру, а их латеральные размеры составляют 5–7 нм.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ гетероструктур QD1–QD5, полученные при комнатной температуре. На спектрах ФЛ наблюдаются три выраженных максимума в области 860, 924, 978 нм. Первый пик в области 860 нм соответствует GaAs, второй пик в области 923 нм



**Рис. 2.** ПЭМ-изображение планарной поверхности гетероструктуры TEM1 (001) в сканирующем режиме.



**Рис. 3.** Спектры ФЛ гетероструктур QD1–QD5, полученные при комнатной температуре.

соответствует КЯ  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ , используемой в качестве поверхности осаждения трансформируемого слоя  $\text{InGaP}$ , третий пик в области 979 нм соответствует аналогичной КЯ, используемой в качестве покрывающего КТ слоя. Сдвиг максимума спектра ФЛ КЯ в коротковолновую область свидетельствует об уменьшении толщины КЯ, связанном с частичным преобразованием верхних слоев КЯ при смене потоков материалов V группы при формировании массива КТ. Максимум спектров ФЛ массива КТ  $\text{InGaP(As)}$  для всех гетероструктур лежит в диапазоне 1027–1195 нм. Из спектров ФЛ массивов КТ видно, что использование КЯ  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  в качестве покрывающего КТ слоя приводит к длинноволновому сдвигу максимума ФЛ на 56 нм. В то же время использование КЯ в качестве поверхности осаждения слоя  $\text{InGaP}$  не оказывает влияния на длину волны максимума

спектра ФЛ массива КТ, что предположительно связано с частичным преобразованием верхних монослоев КЯ, как было описано выше, и возникновением двух упруго компенсированных двумерных слоев  $\text{InGaAs}$  и  $\text{InGaAsP}$ .

Сравнение гетероструктур QD4 и QD5 показало, что с увеличением мольной доли  $\text{InAs}$  с 0.17 до 0.23 наблюдается длинноволновый сдвиг максимума спектра ФЛ на 108 нм, однако при этом также наблюдается уменьшение интенсивности ФЛ в 18 раз вследствие увеличения безызлучательной рекомбинации на структурных дефектах. Для гетероструктур QD1–QD4 количество поверхностных дефектов площадью от 0.6 до 250  $\mu\text{m}^2$  не превышало 20  $\text{cm}^{-2}$ , в то время как для гетероструктуры QD5 данная величина составила 71  $\text{cm}^{-2}$ . Был сделан вывод, что в рассматриваемой конструкции гетероструктуры с КТ  $\text{InGaP(As)}$  для матричного слоя  $\text{InGaAs}$  мольная доля  $\text{InAs}$  0.23 является предельной для формирования бездефектной гетероструктуры.

Среднеквадратичное отклонение для таких параметров, как ширина пика ФЛ массива КТ, измеренная на полувысоте, длина волны и интенсивность максимума спектра ФЛ, не превышало 0.24, 2.80 и 7.9% соответственно. Полученные данные позволяют сделать предположение о возможности получения данным методом замещения элементов V группы гетероструктур с несколькими слоями КТ  $\text{InGaP(As)}$  с высокой однородностью оптических параметров по площади подложки.

#### 4. Заключение

В работе исследовано влияние КЯ  $\text{InGaAs}$  на оптические свойства КТ  $\text{InGaP(As)}$ , полученных путем замещения фосфора мышьяком в слое  $\text{InGaP}$  толщиной 2 нм во время эпитаксиального роста методом МПЭ. Было показано, что длинноволновый сдвиг максимума ФЛ массива КТ наблюдается при использовании КЯ в качестве покрывающего массив КТ слоя. Для КЯ  $\text{InGaAs}$  толщиной 5 нм и с мольной долей  $\text{InAs}$  0.17 длинноволновый сдвиг максимума спектра ФЛ составил 56 нм. Увеличение мольной доли  $\text{InAs}$  в матричном слое  $\text{InGaAs}$  до 0.23 привело к длинноволновому сдвигу максимума спектра ФЛ массива КТ на 108 нм относительно матричного слоя с мольной долей  $\text{InAs}$  0.17, а также к уменьшению интенсивности ФЛ в 18 раз, связанному с безызлучательной рекомбинацией носителей заряда на структурных дефектах.

Поверхностная плотность массива КТ  $\text{InGaP(As)}$  составила до  $1.3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  с латеральными размерами КТ 5–7 нм. Данные массивы КТ могут быть использованы для реализации гетероструктур активных областей источников излучения ближнего ИК-диапазона, в том числе с возможностью реализации нескольких слоев КТ.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект

тематики научных исследований № 2019-1442 (код научной темы FSER-2020-0013).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, И.Г. Табатадзе, П.С. Копьев. *ФТП*, **28** (8), 1483 (1994).
- [2] M. Heydari, A.R. Zali, R.E. Gildeh, A. Farmani. *IEEE Sens. J.*, **22** (7), 6528 (2022). DOI: 10.1109/JSEN.2022.3153656
- [3] J. Kwoen, T. Imoto, Y. Arakawa. *Opt. Express*, **29**(18), 29378 (2021). DOI: 10.1364/OE.433030
- [4] Y. Ma, Y. Zhang, W.Y. William. *J. Mater. Chem. C Mater. Opt. Electron. Dev.*, **7** (44), 13662 (2019). DOI: 10.1039/C9TC04065J
- [5] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, T. Kettler, K. Posilovic, D. Bimberg, L.Ya. Karachinsky, A.Yu. Gladyshev, M.V. Maximov, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh. *J. Cryst. Growth*, **301**, 914 (2007). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2006.09.035
- [6] А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, В.В. Андрюшкин, Д.В. Денисов, В.Н. Неведомский, Е.С. Колодезный, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, А.Ю. Егоров. *ЖТФ*, **90** (12), 2139 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50133.129-20

Редактор А.Н. Смирнов

### The influence of the chemical composition of the surrounding layers on the optical properties of InGaP(As) quantum dots

V.V. Andryushkin<sup>1</sup>, I.I. Novikov<sup>1</sup>, A.G. Gladyshev<sup>1</sup>,  
A.V. Babichev<sup>1</sup>, V.N. Nevedomsky<sup>2</sup>, D.S. Papylev<sup>1</sup>,  
E.S. Kolodeznyi<sup>1</sup>, L.Ya. Karachinsky<sup>1</sup>, A.Yu. Egorov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ITMO University,  
197101 St. Petersburg, Russia

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

<sup>3</sup> „Connector Optics“ LLC,  
194292 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The results of a study of the effect of the location and chemical composition of InGaAs quantum wells in GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs heterostructures on the optical properties of InGaP(As) quantum dots obtained by molecular beam epitaxy due to the substitution of phosphorus with arsenic in the InGaP layer during epitaxial growth are presented. It is shown that a blue shift of the quantum dots array photoluminescence maximum is observed using the InGaAs quantum well as a cap layer. Using of the InGaAs quantum well as the InGaP(As) quantum dots formation surface does not lead to the shift of the maximum photoluminescence spectrum wavelength. An increase of the InAs molar fraction in the InGaAs cap layer from 0.17 to 0.23 leads to a blue shift of the quantum dot array maximum photoluminescence spectrum by 108 nm.