

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1058-1066

УДК 621.315.592

Влияние скорости эпитаксиального роста сильно напряженных квантовых ям InGaAs на фотолюминесценцию гетероструктур на подложках GaAs

Денис Сергеевич Папылев¹✉, Андрей Владимирович Бабичев²,
Андрей Геннадьевич Гладышев³, Леонид Яковлевич Карачинский⁴,
Владислав Васильевич Андрияшкин⁵, Иннокентий Игоревич Новиков⁶,
Арсений Олегович Ефимов⁷, Антон Юрьевич Егоров⁸, Алексей Михайлович Надточий⁹

^{1,2,4,5,6,7} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{3,5,8} ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, 194292, Российская Федерация

⁹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Санкт-Петербургский филиал), Санкт-Петербург, 190008, Российская Федерация

¹ dsapylev@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>

² a.babichev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

³ andrey.gladyshev@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>

⁴ lkarachinsky@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

⁵ vvandriushkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

⁶ innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

⁷ aofimov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2212-0437>

⁸ anton.egorov@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

⁹ al.nadtochy@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>

Аннотация

Введение. Эпитаксия сильно напряженных квантовых ям InGaAs с мольной долей индия более 35 % является технологически сложной задачей. Эффективность люминесценции таких квантовых ям в значительной степени зависит от их структурного качества. Изготовление гетероструктур с упруго-напряженными эпитаксиальными слоями требует оптимизации параметров эпитаксиального роста, одним из которых является скорость роста эпитаксиального слоя. **Метод.** Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs изготовлены гетероструктуры с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0,37 \leq x < 0,41$) с различной скоростью осаждения слоя от 0,24 Å/с до 3,3 Å/с. Методом рентгеновской дифрактометрии определены фактические толщина и состав квантовой ямы, а также исследовано структурное качество гетероструктур. Проведены измерения спектров фотолюминесценции изготовленных гетероструктур при температурах 20 К и 300 К с различной мощностью оптической накачки. На основании зависимости интенсивности фотолюминесценции от мощности накачки произведены расчеты рекомбинационных токов и оценено время безызлучательной рекомбинации в квантовых ямах исследуемых гетероструктур. **Основные результаты.** Содержание InAs в квантовых ямах изготовленных гетероструктур определено в диапазоне 37,0–40,6 %. Исходя из анализа кривых качания рентгеновской дифракции определено ухудшение структурного качества гетероструктур при низкой (0,24 Å/с) скорости роста InGaAs. Измерения методом спектроскопии фотолюминесценции показали значительно более высокую интенсивность фотолюминесценции квантовых ям с умеренной скоростью роста InGaAs (0,9–2,5 Å/с) по сравнению с остальными образцами. Рассчитанные значения времени безызлучательной рекомбинации в квантовых ямах, выращенных при умеренных скоростях роста, составили порядка 10^{-6} с при температуре 20 К и 10^{-9} с при 300 К. В случае увеличения и уменьшения скорости роста время безызлучательной рекомбинации сокращается. **Обсуждение.** Полученные результаты показали достижение наилучшего структурного качества сильно напряженных слоев InGaAs при поддержании скорости роста InGaAs в диапазоне 0,9–2,5 Å/с. Представленные результаты могут быть применены при оптимизации параметров эпитаксиального роста

сильно напряженных квантовых ям InGaAs при изготовлении монолитного вертикально-излучающего лазера на подложке GaAs спектрального диапазона 1200–1300 нм.

Ключевые слова

напряженные квантовые ямы, фотолюминесценция, структурные дефекты, время безызлучательной рекомбинации, молекулярно-пучковая эпитаксия, скорость роста, InGaAs

Благодарности

Работа авторов из Университета ИТМО по анализу данных рентгеновской дифракции и фотолюминесценции поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSER-2025-0025).

А.М. Надточий благодарит Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ за поддержку работы.

Ссылка для цитирования: Папылев Д.С., Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Андриюшкин В.В., Новиков И.И., Ефимов А.О., Егоров А.Ю., Надточий А.М. Влияние скорости эпитаксиального роста сильно напряженных квантовых ям InGaAs на фотолюминесценцию гетероструктур на подложках GaAs // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1058–1066. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1058-1066

Influence of the growth rate of a highly strained InGaAs quantum well on the photoluminescence of a heterostructures grown on GaAs substrate

Denis S. Papylev^{1✉}, Andrey V. Babichev², Andrey G. Gladyshev³, Leonid Ya. Karachinsky⁴, Vladislav V. Andryushkin⁵, Innokenty I. Novikov⁶, Arseny O. Efimov⁷, Anton Yu. Egorov⁸, Alexey M. Nadtochiy⁹

^{1,2,4,5,6,7} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{3,5,8} Connector Optics LLC, Saint Petersburg, 194292, Russian Federation

⁹ National Research University Higher School of Economics, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation

¹ dspapylev@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>

² a.babichev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

³ andrey.gladyshev@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>

⁴ lkarachinsky@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

⁵ vvandriushkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

⁶ innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

⁷ aoefimov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2212-0437>

⁸ anton.egorov@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

⁹ al.nadtochy@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>

Abstract

Epitaxy of highly strained InGaAs quantum wells with a mole fraction of indium exceeding 35 % is a technologically challenging task. The structural quality of these elastically strained epitaxial layers greatly affects the photoluminescence efficiency of quantum wells. Therefore, in order to achieve high structural quality, optimization of the epitaxial growth parameters is required, one of which is the growth rate of the epitaxial layer. Heterostructures containing the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.37 \leq x < 0.41$) quantum well were produced on GaAs substrates by molecular beam epitaxy with different growth rates of InGaAs ranging from 0.24 to 3.3 Å/s. The actual thickness and composition of the quantum well were determined by X-ray diffractometry, as well as the structural quality of the heterostructures was investigated. The photoluminescence spectra of the manufactured heterostructures were measured at temperatures of 20 K and 300 K at different optical pumping powers. Based on the dependence of photoluminescence intensity on pumping power, recombination currents were calculated and the time of non-radiative recombination in the studied structures was estimated. The InAs content in the quantum wells of the manufactured heterostructures ranged from 37.0 % to 40.6 %. Based on analysis of X-ray rocking curves, deterioration of structural quality at low deposition rate of 0.24 Å/s was observed. The photoluminescence spectroscopy measurements showed a significantly higher photoluminescence intensity of quantum wells at moderate growth rates of InGaAs (0.9–2.5 Å/s) compared to other samples. The calculated values for the non-radiative recombination lifetime of quantum wells produced at these moderate growth rates were in the order of 10^{-6} s at 20 K and 10^{-9} s at 300 K. At higher or lower growth rates, the values of the non-radiative recombination lifetime decreased. The results obtained demonstrate the achievement of the best structural quality for highly strained InGaAs layers produced at 0.9–2.5 Å/s growth rate. These results can be used to optimize the parameters of epitaxial growth processes for highly strained quantum wells based on InGaAs, for fabricating monolithic vertical-cavity surface-emitting lasers, based on GaAs substrate, operating in the 1200–1300 nm spectral range.

Keywords

strained quantum wells, photoluminescence, structural defects, non-recombination lifetime, molecular-beam epitaxy, growth rate, InGaAs

Acknowledgements

The work of the authors from ITMO University on the X-ray diffraction and photoluminescence data analysis was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. FSER-2025-0025).

Nadtochiy A. M. thanks the HSE Fundamental Research Program for supporting the work.

For citation: Papylev D.S., Babichev A.V., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Andryushkin V.V., Novikov I.I., Efimov A.O., Egorov A.Yu., Nadochiy A.M. Influence of the growth rate of a highly strained InGaAs quantum well on the photoluminescence of a heterostructures grown on GaAs substrate. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1058–1066 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1058-1066

Введение

При формировании активной области полупроводниковых лазеров на основе решеточно-согласованных с подложкой материалов спектральный диапазон излучения ограничен шириной запрещенной зоны таких материалов. Для расширения спектрального диапазона в качестве активной области могут использоваться упруго-напряженные квантовые ямы (КЯ) InGaAs на подложке арсенида галлия (GaAs). Так, при использовании сильно напряженных КЯ InGaAs с мольной долей индия (In), достигающей 40 %, может быть достигнуто излучение с длиной волны свыше 1200 нм [1, 2]. Применение такого подхода перспективно для изготовления на подложке GaAs монолитных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1200–1300 нм [3–5], востребованных в современной сенсорике и телекоммуникациях.

Основным препятствием для изготовления гетероструктур вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1200–1300 нм на основе КЯ InGaAs является сложность эпитаксии сильно напряженных слоев высокого структурного качества. Характерное при псевдоморфном росте состава $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ на подложке GaAs рассогласование постоянных решеток подложки a_{sub} и эпитаксиального слоя a_{film} , равное $(a_{\text{film}} - a_{\text{sub}})/a_{\text{sub}} \approx 2,9 \%$, приводит к возникновению значительных упругих напряжений сжатия в латеральной плоскости [6].

В зависимости от ростовых параметров релаксация напряжений может происходить через переход от планарного к островковому режиму роста [7], а также через образование дислокаций несоответствия [8]. В результате образование структурных дефектов приводит к формированию центров безызлучательной рекомбинации, способствующих снижению эффективности люминесценции в КЯ [9]. Для предотвращения релаксации напряжений в сжатом слое КЯ InGaAs могут использоваться барьеры арсенид-фосфида галлия (GaAsP) [10], позволяющие компенсировать напряжения [11]. Однако резкость гетерограниц КЯ при таком подходе может ухудшаться за счет формирования промежуточного слоя арсенид-фосфида галлия-индия (InGaAsP), который образуется в результате диффузии атомов In в барьер GaAsP [12], что может привести к уширению спектра люминесценции.

В связи со сложностями эпитаксии сильно напряженных слоев InGaAs возникает необходимость оптимизации параметров эпитаксиального роста, влияющих на структурное качество псевдоморфных КЯ: температуры подложки [13], соотношения потоков материалов V/III групп и скорости роста эпитаксиального слоя [14]. Кроме этого, для достижения высокого структурного качества слоев используется прерывание роста с изменением температуры подложки перед эпитаксией InGaAs ввиду подверженности атомов In

к переиспарению при оптимальной для роста GaAs температуре [15].

В настоящей работе методами рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии люминесценции исследуется влияние скорости роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии сильно напряженных слоев InGaAs с мольной долей In более 35 % на структурное качество КЯ. Основываясь на зависимости интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) от мощности оптической накачки приведена расчетная оценка времени безызлучательной рекомбинации для КЯ, сформированных при различных скоростях эпитаксиального роста слоев.

Материалы и методы

Для проведения исследования методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs (001) с буферным слоем GaAs 300 нм были выращены пять гетероструктур с КЯ. Гетероструктуры содержали одиночные КЯ $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ толщиной 7 нм, которые расположены между обкладочными слоями GaAs толщиной 100 нм, прилегающими к КЯ, и слоями $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ толщиной 50 нм. Состав слоев тройных растворов определялся по предварительно откалиброванным линейным зависимостям скорости роста бинарных составов от температуры эффузионных источников материалов. Образцы различались скоростью роста слоя InGaAs. Для образцов 1, 2 и 3 скорость роста составляла 0,24 Å/с, 0,9 Å/с и 2,5 Å/с соответственно, а для образцов 4 и 5 — 3,3 Å/с. Было выявлено, что содержание In в образце 4 значительно отличается от остальных, поэтому был выращен образец 5 с уточненными температурами эффузионных источников и такой же скоростью роста слоя. Эпитаксия слоев GaAs и арсенида алюминия-галлия (AlGaAs) производилась при температуре подложки 853 К, при эпитаксии слоя InGaAs и прикрывающего его слоя GaAs толщиной 2 нм температура подложки была понижена до 673 К. Соотношение потоков материалов III и V групп поддерживалось равным 1/10.

Фактический состав и толщина КЯ определялись методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре высокого разрешения PANalytical X'Pert PRO MRD с гибридным четырех-кристалльным щелевым Ge (400) монохроматором при $\omega/2\theta$ симметричном сканировании отражения (004). Измеренные кривые качения моделировались с использованием программного обеспечения X'Pert Epitaxy. Образцы исследовались методом спектроскопии ФЛ при температурах 20 К и 300 К. Оптическая накачка образцов осуществлялась излучением Nd:YAG лазера 532 нм, сфокусированным в пятно размером 65 мкм. Максимальная мощность оптической накачки составляла 150 мВт и варьировалась посредством использования нейтральных светофильтров. Излучение ФЛ анализировалось с применением монохроматора МДР-23 и детектировалось одноканаль-

ным охлаждаемым Ge-фотодиодом в режиме синхронного детектирования.

Результаты и обсуждение

Измеренные рентгенодифракционные кривые качания (рис. 1) содержат пик состава InGaAs, расположенный левее высокоинтенсивного узкого пика подложки GaAs. Отметим, что на кривых качания присутствуют высокочастотные толщинные осцилляции, образованные интерференцией излучения, отраженного от интерфейсов верхних слоев GaAs/AlGaAs. Такой же эффект создает низкочастотные толщинные осцилляции от тонкого слоя InGaAs, формирующие пик между пиками подложки и состава InGaAs.

Для образцов 2–5, экспериментальные кривые качания хорошо описываются моделируемыми кривыми. В характерной для образца 1 кривой качания слабо выражен пик состава InGaAs, а также отсутствуют толщинные осцилляции как от КЯ, так и от слоев GaAs/AlGaAs, что указывает на ухудшение структурного качества гетероинтерфейсов в структуре, являющегося причиной диффузного рассеяния рентгеновского излучения [16]. Ухудшение структурного качества слоев образца 1 при низкой скорости роста может быть связано с переходом к островковому режиму роста, обусловленному увеличением длины поверхностной диффузии атомов при повышении времени экспозиции эпитаксиальной поверхности [7].

Результаты определения толщины и состава КЯ методом рентгеновской дифрактометрии представлены в таблице. Для образца 1 достоверное определение толщины КЯ не представляется возможным. В результате моделирования кривых качания определено, что оценочная толщина КЯ в гетероструктурах достигает 7,2–7,9 нм. Содержание In при этом составляет от 37,0 % для образца 2 и до 40,6 % для образца 4.

Представленные на рис. 2 результаты измерений спектров ФЛ образца 3 при различных мощностях оптической накачки демонстрируют типовые для всех исследуемых образцов спектры ФЛ, за исключением отличительных особенностей, описанных далее. Аналогично спектрам образца 3 при температуре 20 К образцы 1, 2, 4 и 5 демонстрируют одиночный пик ФЛ, не изменяющий своего положения в диапазоне низких мощностей накачки. Для образцов 2 и 3 при повышении мощности накачки до 4,5 мВт (рис. 2, а) происходит коротковолновой сдвиг пика ФЛ, указывающий на насыщение основного и возбуждение более высокоэнергетических излучательных переходов. Для образца 1 коротковолновой сдвиг наблюдается при мощности накачки 150 мВт. Для образцов 4 и 5 при используемых мощностях накачки сдвига длины волны ФЛ не наблюдается. Длина волны пика ФЛ при малых мощностях накачки для образцов 1, 2, 3 и 5 при температуре 20 К определена в диапазоне длин волн 1105–1110 нм. Для образца 4 длина волны пика ФЛ составила 1141 нм, что связано с повышенным содержанием In в КЯ. При температуре 300 К измеренные спектры образцов 2, 4 и 5 аналогично образцу 3 (рис. 2, б) также демонстрируют одиночный, но значительно уширенный пик излучения КЯ. При этом не наблюдается коротковолнового сдвига

Таблица. Скорости роста и измеренные параметры КЯ
Table. Growth rate and measured parameters of quantum wells

Номер образца	Скорость роста, Å/с	Содержание InAs, %	Толщина КЯ, нм
1	0,24	38,6	—
2	0,90	37,0	7,9
3	2,50	38,2	7,6
4	3,30	40,6	7,8
5	3,30	38,5	7,2

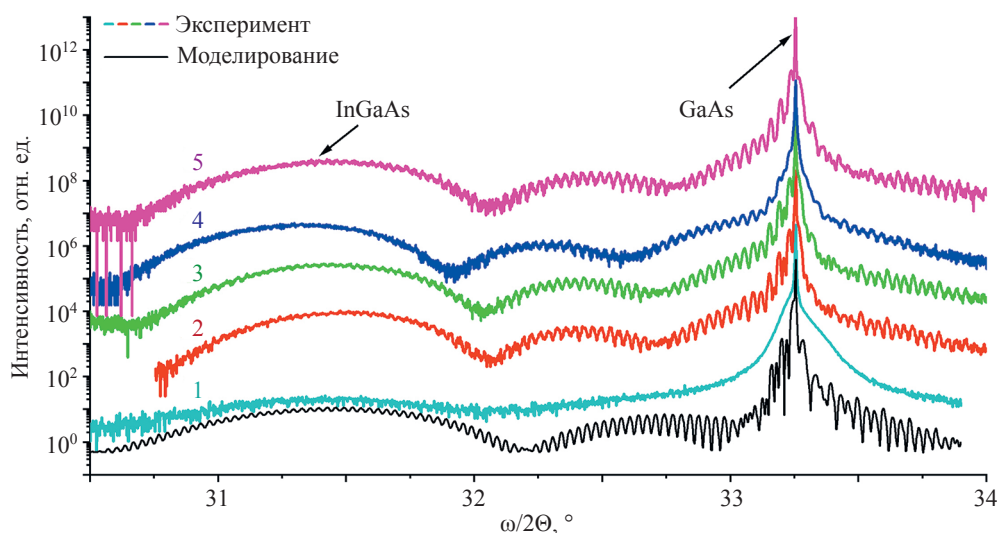


Рис. 1. Экспериментально измеренные и смоделированная для образца 1 кривые качания рентгеновской дифракции. Кривые качания сдвинуты по вертикальной оси для наглядности

Fig. 1. The X-ray diffraction rocking curves measured and modeled for sample 1. The swing curves are shifted along the vertical axis for clarity

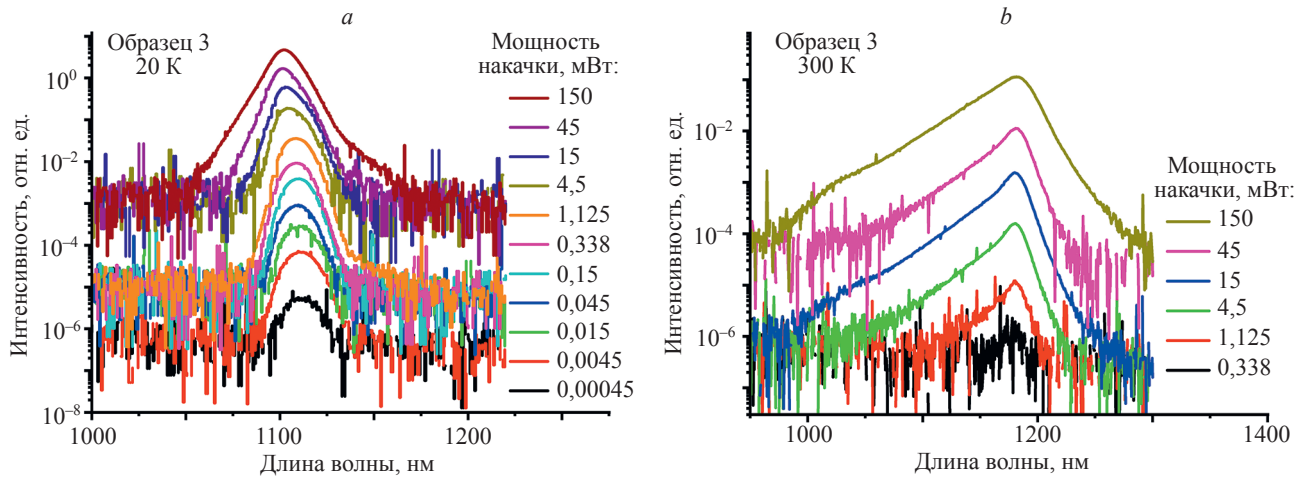


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции квантовых ям при температурах 20 К (а) и 300 К (б) при различной мощности накачки
Fig. 2. Photoluminescence spectra measured at 20 K (a) and 300 K (b) at different pumping power

пика излучения во всем диапазоне мощности накачки. Однако в спектре ФЛ от образца 1 не было обнаружено различного пика от КЯ.

Зависимости интегральной интенсивности ФЛ от мощности оптической накачки представлены на рис. 3. При одинаковых мощностях накачки образцы 2 и 3 демонстрируют значительно более высокую интегральную интенсивность ФЛ по сравнению с образцами 1, 4 и 5. Наблюдаемые на зависимостях загибы при увеличении мощности накачки у образцов 1, 2 и 3 коррелируют с ранее отмеченными на спектрах более высокоэнергетическими переходами. Наблюдаемый при высокой мощности накачки резкий загиб зависимости у образца 1, а также полная деградация пика ФЛ от КЯ при комнатной температуре может указывать на разные по своей природе структурные дефекты, являющиеся причиной безызлучательной рекомбинации носителей заряда при чрезмерно низких и высоких скоростях роста напряженных слоев.

Расчет времени безызлучательной рекомбинации

Для оценки времени безызлучательной рекомбинации использовалась модель расчета рекомбинационных токов в гетероструктуре в зависимости от мощности накачки. По причине отсутствия легирования гетероструктур основными механизмами рекомбинации в структурах являются рекомбинация Шокли–Рида–Холла и излучательная рекомбинация, влияние Оже-рекомбинации не должно быть существенным при относительно низких концентрациях носителей заряда. В используемой модели принято условие электронейтральности в системе КЯ и барьерах GaAs:

$$p_{QW} - n_{QW} + p_B - n_B = 0,$$

где p_{QW} , n_{QW} — концентрации в КЯ дырок и электронов соответственно; p_B , n_B — соответствующие концентрации дырок и электронов в барьерах.

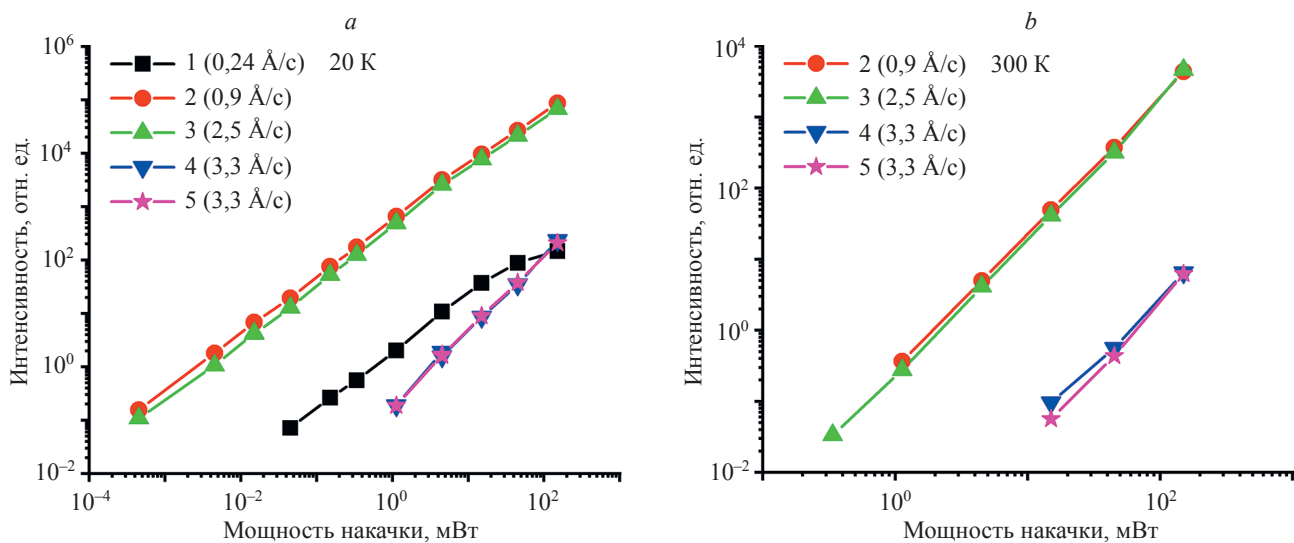


Рис. 3. Зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции от мощности накачки при температурах 20 К (а) и 300 К (б)
Fig. 3. Dependences of the integral photoluminescence intensity on the pumping power at temperatures 20 K (a) and 300 K (b)

Полный рекомбинационный ток J_{exc} , соответствующий мощности оптической накачки, определяется суммой безызлучательных J_{Bnr} , J_{QWnr} и излучательных J_{Brad} , J_{QWrad} рекомбинационных токов в барьерах и КЯ соответственно:

$$\begin{aligned} J_{exc} &= J_{Brad} + J_{QWrad} + J_{Bnr} + J_{QWnr}; \\ J_{Brad} &= qBn_Bp_B; \\ J_{QWrad} &= qBn_{QW}p_{QW}; \\ J_{Bnr} &= qdn_B/\tau_{Bnr}; \\ J_{QWnr} &= qn_{QW}/\tau_{QWnr}, \end{aligned}$$

где q — элементарный заряд; B — коэффициент излучательной рекомбинации, определенный в работе [17]; τ_{Bnr} , τ_{QWnr} — время безызлучательной рекомбинации в барьерах и КЯ соответственно. В КЯ рекомбинационные токи определяются двумерной концентрацией носителей заряда p_{QW} и n_{QW} , в случае барьера значения тока, полученные с использованием объемных концентраций носителей заряда p_B и n_B домножаются на толщину барьерных слоев d .

Концентрации электронов (дырок) в КЯ и в барьерах вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} n(p)_{QW} &= \frac{m_{QWn(p)}k_BT}{\pi\hbar^2} \ln\left(\exp\left(\frac{\mu_{n(p)}}{k_BT}\right) + 1\right); \\ n(p)_B &= 2\left(\frac{m_{Bn(p)}k_BT}{2\pi\hbar^2}\right)^{2/3} \exp\left(\frac{\mu_{n(p)} - \Delta E_{Bn(p)}}{k_BT}\right); \end{aligned}$$

где m — эффективная масса носителей заряда; k_B — постоянная Больцмана; \hbar — приведенная постоянная

Планка; μ — энергия квази-уровня Ферми в зоне проводимости и валентной зоне, отчитываемые от дна (потолка) КЯ; ΔE_B — высота барьера. Расчеты производились при постоянном значении времени безызлучательной рекомбинации в барьере GaAs, равной 1 нс при температурах 20 К и 300 К [18]. На рис. 4 представлены результаты расчетов, демонстрирующие расчетные зависимости роста относительной интенсивности ФЛ с ростом мощности накачки при различном времени безызлучательной рекомбинации.

По результатам расчетов зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки для исследуемых в работе образцов 1–5 определено τ_{QWnr} , при котором достигается наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Полученные результаты оценки времени безызлучательной рекомбинации представлены на рис. 5 в виде зависимости от используемой при изготовлении гетероструктуры скорости роста КЯ. Исходя из полученных результатов, наибольшее влияние скорости роста на время безызлучательной рекомбинации наблюдается при температуре 20 К. При умеренных скоростях роста (0,9–2,5 Å/с) время безызлучательной рекомбинации составляет порядка 10^{-6} с, при минимальной скорости роста (0,24 Å/с) — $3 \cdot 10^{-7}$ с. Увеличение скорости роста до 3,3 Å/с приводит к более значительному снижению времени безызлучательной рекомбинации до (4–5) $\cdot 10^{-9}$ с. При комнатной температуре тепловое уширение значительно влияет на процессы рекомбинации — наблюдается меньшее изменение времени безызлучательной рекомбинации при различных скоростях роста. Для образцов 2–5 при увеличении скорости роста КЯ наблюдается снижение времени безызлучательной рекомбинации с $3 \cdot 10^{-9}$ с до $8 \cdot 10^{-10}$ с.

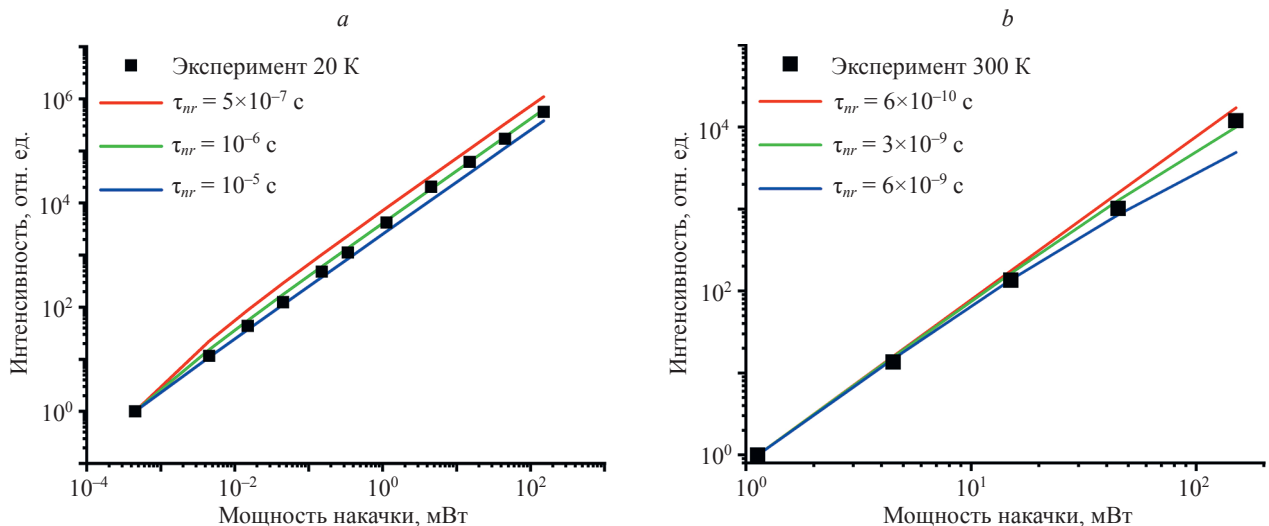


Рис. 4. Расчетные зависимости интенсивности фотолуминесценции от мощности накачки при различном времени безызлучательной рекомбинации при температурах 20 К (а) и 300 К (б)

Fig. 4. Calculated dependences of the photoluminescence intensity on the pumping power at different non-radiative lifetime values at temperatures 20 K (a) and 300 K (b)

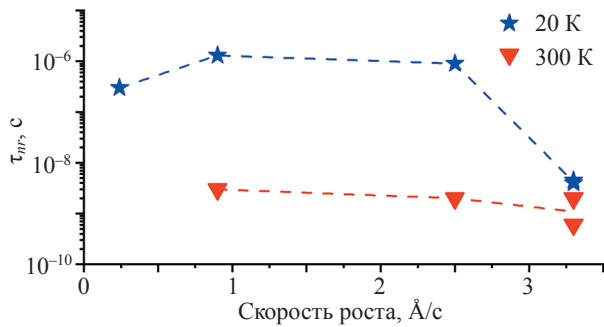


Рис. 5. Расчетные значения времени безызлучательной рекомбинации в зависимости от скорости роста InGaAs в образцах 1–5 при 20 К и образцах 2–5 при 300 К

Fig. 5. Calculated values of non-radiative recombination lifetimes vs. the InGaAs growth rate in samples 1–5 at 20 K and samples 2–5 at 300 K

Литература

1. Sundgren P., Berggren J., Goldman P., Hammar M. Highly strained InGaAs/GaAs multiple quantum-wells for laser applications in the 1200–1300 nm wavelength regime // *Applied Physics Letters*, 2005, V. 87, N 7, P. 071104. <https://doi.org/10.1063/1.2010615>
2. Sundgren P., von Würtemberg R.M., Berggren J., Hammar M., Ghisoni M., Oscarsson V., Ödling E., Malmquist J. High-performance 1.3 μm InGaAs vertical cavity surface emitting lasers // *Electronics Letters*, 2003, V. 39, N 15, P. 1128–1129. <https://doi.org/10.1049/el:20030733>
3. Kondo T., Arai M., Onomura A., Miyamoto T., Koyama F. 1.23 μm long wavelength highly strained GaInAs/GaAs quantum well laser // *Proc. of the 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2002, P. 618–619. <https://doi.org/10.1109/LEOS.2002.1159459>
4. Westbergh P., Söderberg E., Gustavsson J.S., Modh P., Larsson A., Zhang Z., Berggren J., Hammar M. Single mode 1.3 μm InGaAs VCSELs for access network applications // *Proceedings of SPIE*, 2008, V. 6997, P. 69970Y. <https://doi.org/10.1117/12.781294>
5. Takeda K., Miyamoto T., Kondo T., Uchiyama Y., Kitabayashi N., Uchida T., Matsutani A., Koyama F. Wavelength extension effect on lasing characteristics of highly-strained GaInAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers with cavity detuning // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, V. 45, N 8S, P. 6691. <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.6691>
6. Deki R., Sasaki T., Takahashi M. Strain relaxation and compositional separation during growth of InGaAs/GaAs (001) // *Journal of Crystal Growth*, 2017, V. 468, P. 241–244. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.01.028>
7. Grandjean N., Massies J. Epitaxial growth of highly strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ on GaAs (001): the role of surface diffusion length // *Journal of Crystal Growth*, 1993, V. 134, N 1-2, P. 51–62. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(93\)90008-k](https://doi.org/10.1016/0022-0248(93)90008-k)
8. Chang K.H., Bhattacharya P.K., Gibala R. Characteristics of dislocations at strained heteroepitaxial InGaAs/GaAs interfaces // *Journal of Applied Physics*, 1989, V. 66, N 7, P. 2993–2998. <https://doi.org/10.1063/1.344183>
9. Yang V.K., Ting S.M., Groenert M.E., Bulsara M.T., Currie M.T., Leitz C.W., Fitzgerald E.A. Comparison of luminescent efficiency of InGaAs quantum well structures grown on Si, GaAs, Ge, and SiGe virtual substrate // *Journal of Applied Physics*, 2003, V. 93, N 9, P. 5095–5102. <https://doi.org/10.1063/1.1563031>
10. Sun W., Kim H., Mawst L.J., Tansu N. Interplay of GaAsP barrier and strain compensation in InGaAs quantum well at near-critical thickness // *Journal of Crystal Growth*, 2020, V. 531, P. 125381. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125381>

Заключение

В результате определено, что наиболее подходящая скорость роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии сильно напряженных слоев $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ на подложке GaAs находится в диапазоне 0,9–2,5 Å/с. Как увеличение, так и уменьшение скорости роста относительно этого диапазона приводит к значительному уменьшению времени безызлучательной рекомбинации носителей заряда, в результате чего интенсивность фотолюминесценции квантовых ям снижается. Более подробное изучение влияния скорости роста слоя квантовых ям возможно при проведении дополнительных измерений и расчетов зависимостей интенсивности фотолюминесценции от мощности накачки, а также при исследовании образцов гетероструктур с квантовыми ямами, выращенных при промежуточных скоростях роста диапазона 0,9–2,5 Å/с. Полученные результаты позволяют изготавливать сильно напряженные квантовые ямы InGaAs, являющие перспективными для производства монолитных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1200–1300 нм.

References

1. Sundgren P., Berggren J., Goldman P., Hammar M. Highly strained InGaAs/GaAs multiple quantum-wells for laser applications in the 1200–1300 nm wavelength regime. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, no. 7, pp. 071104. <https://doi.org/10.1063/1.2010615>
2. Sundgren P., von Würtemberg R.M., Berggren J., Hammar M., Ghisoni M., Oscarsson V., Ödling E., Malmquist J. High-performance 1.3 μm InGaAs vertical cavity surface emitting lasers. *Electronics Letters*, 2003, vol. 39, no. 15, pp. 1128–1129. <https://doi.org/10.1049/el:20030733>
3. Kondo T., Arai M., Onomura A., Miyamoto T., Koyama F. 1.23 μm long wavelength highly strained GaInAs/GaAs quantum well laser. *Proc. of the 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2002, pp. 618–619. <https://doi.org/10.1109/LEOS.2002.1159459>
4. Westbergh P., Söderberg E., Gustavsson J.S., Modh P., Larsson A., Zhang Z., Berggren J., Hammar M. Single mode 1.3 μm InGaAs VCSELs for access network applications. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6997, pp. 69970Y. <https://doi.org/10.1117/12.781294>
5. Takeda K., Miyamoto T., Kondo T., Uchiyama Y., Kitabayashi N., Uchida T., Matsutani A., Koyama F. Wavelength extension effect on lasing characteristics of highly-strained GaInAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers with cavity detuning. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 8S, pp. 6691. <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.6691>
6. Deki R., Sasaki T., Takahashi M. Strain relaxation and compositional separation during growth of InGaAs/GaAs (001). *Journal of Crystal Growth*, 2017, vol. 468, pp. 241–244. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.01.028>
7. Grandjean N., Massies J. Epitaxial growth of highly strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ on GaAs (001): the role of surface diffusion length. *Journal of Crystal Growth*, 1993, vol. 134, no. 1-2, pp. 51–62. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(93\)90008-k](https://doi.org/10.1016/0022-0248(93)90008-k)
8. Chang K.H., Bhattacharya P.K., Gibala R. Characteristics of dislocations at strained heteroepitaxial InGaAs/GaAs interfaces. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 7, pp. 2993–2998. <https://doi.org/10.1063/1.344183>
9. Yang V.K., Ting S.M., Groenert M.E., Bulsara M.T., Currie M.T., Leitz C.W., Fitzgerald E.A. Comparison of luminescent efficiency of InGaAs quantum well structures grown on Si, GaAs, Ge, and SiGe virtual substrate. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 93, no. 9, pp. 5095–5102. <https://doi.org/10.1063/1.1563031>
10. Sun W., Kim H., Mawst L.J., Tansu N. Interplay of GaAsP barrier and strain compensation in InGaAs quantum well at near-critical thickness. *Journal of Crystal Growth*, 2020, vol. 531, pp. 125381. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125381>

11. Sweeney S.J., Eales T.D., Adams A.R. The impact of strained layers on current and emerging semiconductor laser systems // *Journal of Applied Physics*. 2019. V. 125. N 8. P. 082538. <https://doi.org/10.1063/1.5063710>
12. Dong H., Sun J., Ma S., Liang J., Jia Z., Liu X., Xu B. Interfacial relaxation analysis of InGaAs/GaAsP strain-compensated multiple quantum wells and its optical property // *Superlattices and Microstructures*. 2018. V. 114. P. 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.12.049>
13. Jasik A., Wnuk A., Wójcik-Jedlińska A., Jakiela R., Muszalski J., Strupiński W., Bugajski M. The influence of the growth temperature and interruption time on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods // *Journal of Crystal Growth*. 2008. V. 310. N 11. P. 2785–2792. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.02.018>
14. Jasik A., Wnuk A., Gaca J., Wójcik M., Wójcik-Jedlińska A., Muszalski J., Strupiński W. The influence of the growth rate and V/III ratio on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods // *Journal of Crystal Growth*. 2009. V. 311. N 19. P. 4423–4432. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.07.032>
15. Wang Q., Wang H., Zhang B., Wang X., Liu W., Wang J., Wang J., Fan J., Zou Y., Ma X. Integrated fabrication of a high strain InGaAs/GaAs quantum well structure under variable temperature and improvement of properties using MOCVD technology // *Optical Materials Express*. 2021. V. 11. N 8. P. 2378–2388. <https://doi.org/10.1364/OME.431015>
16. Chuev M.A., Lomov A.A., Imamov R.M. Simultaneous analysis of double-crystal X-ray rocking curves from a set of crystallographic planes // *Crystallography Reports*. 2006. V. 51. N 2. P. 178–191. <https://doi.org/10.1134/S1063774506020027>
17. Asryan L.V. Spontaneous radiative recombination and nonradiative Auger recombination in quantum-confined heterostructures // *Quantum Electronics*. 2005. V. 35. N 12. P. 1117–1120. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n12ABEH013093>
18. Gurioli M., Vinattieri A., Colocci M., Deparis C., Massies J., Neu G., Bosacchi A., Franchi S. Temperature dependence of the radiative and nonradiative recombination time in GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum-well structures // *Physical Review B*. 1991. V. 44. N 7. P. 3115–3124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.3115>
11. Sweeney S.J., Eales T.D., Adams A.R. The impact of strained layers on current and emerging semiconductor laser systems. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 8, pp. 082538. <https://doi.org/10.1063/1.5063710>
12. Dong H., Sun J., Ma S., Liang J., Jia Z., Liu X., Xu B. Interfacial relaxation analysis of InGaAs/GaAsP strain-compensated multiple quantum wells and its optical property. *Superlattices and Microstructures*, 2018, vol. 114, pp. 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.12.049>
13. Jasik A., Wnuk A., Wójcik-Jedlińska A., Jakiela R., Muszalski J., Strupiński W., Bugajski M. The influence of the growth temperature and interruption time on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods. *Journal of Crystal Growth*, 2008, vol. 310, no. 11, pp. 2785–2792. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.02.018>
14. Jasik A., Wnuk A., Gaca J., Wójcik M., Wójcik-Jedlińska A., Muszalski J., Strupiński W. The influence of the growth rate and V/III ratio on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods. *Journal of Crystal Growth*, 2009, vol. 311, no. 19, pp. 4423–4432. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.07.032>
15. Wang Q., Wang H., Zhang B., Wang X., Liu W., Wang J., Wang J., Fan J., Zou Y., Ma X. Integrated fabrication of a high strain InGaAs/GaAs quantum well structure under variable temperature and improvement of properties using MOCVD technology. *Optical Materials Express*, 2021, vol. 11, no. 8, pp. 2378–2388. <https://doi.org/10.1364/OME.431015>
16. Chuev M.A., Lomov A.A., Imamov R.M. Simultaneous analysis of double-crystal X-ray rocking curves from a set of crystallographic planes. *Crystallography Reports*, 2006, vol. 51, no. 2, pp. 178–191. <https://doi.org/10.1134/S1063774506020027>
17. Asryan L.V. Spontaneous radiative recombination and nonradiative Auger recombination in quantum-confined heterostructures. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1117–1120. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n12ABEH013093>
18. Gurioli M., Vinattieri A., Colocci M., Deparis C., Massies J., Neu G., Bosacchi A., Franchi S. Temperature dependence of the radiative and nonradiative recombination time in GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum-well structures. *Physical Review B*, 1991, vol. 44, no. 7, pp. 3115–3124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.3115>

Авторы

Папылев Денис Сергеевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 59241769900](https://orcid.org/0009-0001-3683-5558), <https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>, dsapylev@itmo.ru

Бабичев Андрей Владимирович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56819964000](https://orcid.org/0000-0002-3463-4744), <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>, a.babichev@itmo.ru

Гладышев Андрей Геннадьевич — кандидат физико-математических наук, главный специалист по эпитаксии, ООО «Коннектор Оптикс», 194292, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [sc 6701588481](https://orcid.org/0000-0002-9448-2471), <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>, andrey.gladyshev@connector-optics.com

Карачинский Леонид Яковлевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603558355](https://orcid.org/0000-0002-5634-8183), <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>, lkarachinsky@itmo.ru

Андрюшкин Владислав Васильевич — кандидат технических наук, ведущий специалист по эпитаксии, ООО «Коннектор Оптикс», 194292, Санкт-Петербург, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57209329441](https://orcid.org/0000-0002-7471-8627), <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>, vvandriushkin@itmo.ru

Новиков Иннокентий Игоревич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7202658480](https://orcid.org/0000-0003-1983-0242), <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>, innokenty.novikov@itmo.ru

Ефимов Арсений Олегович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7202658480](https://orcid.org/0009-0009-2212-0437), <https://orcid.org/0009-0009-2212-0437>, aoeffimov@itmo.ru

Егоров Антон Юрьевич — доктор физико-математических наук, технический директор, ООО «Коннектор Оптикс», 194292, Санкт-

Authors

Denis S. Papylev — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 59241769900](https://orcid.org/0009-0001-3683-5558), <https://orcid.org/0009-0001-3683-5558>, dsapylev@itmo.ru

Andrey V. Babichev — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56819964000](https://orcid.org/0000-0002-3463-4744), <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>, a.babichev@itmo.ru

Andrey G. Gladyshev — PhD (Physics & Mathematics), Chief Epitaxy Specialist, Connector Optics LLC, Saint Petersburg, 194292, Russian Federation, [sc 6701588481](https://orcid.org/0000-0002-9448-2471), <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>, andrey.gladyshev@connector-optics.com

Leonid Ya. Karachinsky — D.Sc., Leading Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603558355](https://orcid.org/0000-0002-5634-8183), <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>, lkarachinsky@itmo.ru

Vladislav V. Andriushkin — PhD, Leading Specialist in Epitaxy, Connector Optics LLC, Saint Petersburg, 194292, Russian Federation; Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57209329441](https://orcid.org/0000-0002-7471-8627), <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>, vvandriushkin@itmo.ru

Innokenty I. Novikov — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7202658480](https://orcid.org/0000-0003-1983-0242), <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>, innokenty.novikov@itmo.ru

Arseny O. Efimov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7202658480](https://orcid.org/0009-0009-2212-0437), <https://orcid.org/0009-0009-2212-0437>, aoeffimov@itmo.ru

Anton Yu. Egorov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Chief Technology Officer, Connector Optics LLC, Saint Petersburg, 194292, Russian

Петербург, Российская Федерация, [sc 7202362169](https://orcid.org/0000-0002-0789-4241), <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>, anton.egorov@connector-optics.com

Надточий Алексей Михайлович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, 190008, Российская Федерация, [sc 26642604500](https://orcid.org/0000-0003-0982-907X), <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>, al.nadtochy@mail.ioffe.ru

Federation, [sc 7202362169](https://orcid.org/0000-0002-0789-4241), <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>, anton.egorov@connector-optics.com

Alexey M. Nadtochy — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, National Research University Higher School of Economics, Saint Petesburg, 190008, Russian Federation, [sc 26642604500](https://orcid.org/0000-0003-0982-907X), <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>, al.nadtochy@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2025
Одобрена после рецензирования 10.10.2025
Принята к печати 21.11.2025

Received 30.09.2025
Approved after reviewing 10.10.2025
Accepted 21.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»