

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-921-928

УДК 621.315.592

Влияние низких температур и термического отжига на оптические свойства квантовых точек InGaPAs

Владислав Васильевич Андришкин¹✉, Анна Сергеевна Драгунова²,
Сергей Дмитриевич Комаров³, Алексей Михайлович Надточий⁴,
Андрей Геннадьевич Гладышев⁵, Андрей Владимирович Бабичев⁶,
Александр Вячеславович Уваров⁷, Иннокентий Игоревич Новиков⁸,
Евгений Сергеевич Колодезный⁹, Леонид Яковлевич Карачинский¹⁰,
Наталья Владимировна Крыжановская¹¹, Владимир Николаевич Неведомский¹²,
Антон Юрьевич Егоров¹³, Владислав Евгеньевич Бугров¹⁴

^{1,5,6,8,9,10,14} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{2,3,4,11} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург 190008, Российская Федерация

⁷ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

⁷ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

¹² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹³ ООО «Коннектор Оптик», Санкт-Петербург, 194292, Российская Федерация

¹ vvandriushkin@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

² adragunova@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0181-0262>

³ skomarov@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7025-3527>

⁴ anadtochiy@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>

⁵ andrey.gladyshev@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>

⁶ andrey.babichev@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

⁷ lumenlight@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0061-6687>

⁸ innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

⁹ evgenii_kolodeznyi@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

¹⁰ leonid.karachinsky@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

¹¹ nataliakryzh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4945-9803>

¹² nevedom@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>

¹³ anton.egorov@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

¹⁴ vladislav.bougrov@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования оптических свойств низкоплотных квантовых точек InGaPAs. Показано влияние на оптические и структурные свойства квантовых точек низких температур и параметров термического отжига. **Метод.** Квантовые точки InGaPAs получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии за счет замещения фосфора на мышьяк в тонком слое InGaP непосредственно в процессе эпитаксиального роста. Оптические свойства квантовых точек InGaPAs исследованы методом спектроскопии фотолюминесценции, в том числе при температуре жидкого азота ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), что позволило определить особенности безызлучательной рекомбинации в исследуемых гетероструктурах. Гетероструктуры были подвергнуты кратковременному термическому отжигу при температурах 600 и $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 мин для оценки влияния отжига на оптические и структурные свойства квантовых точек. **Основные результаты.** Показано, что при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ вклад безызлучательной рекомбинации можно считать несущественным для всего измеряемого диапазона мощности накачки. При температуре $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольший вклад в безызлучательную рекомбинацию вносит рекомбинация Шоккли–Рида. Кратковременный отжиг гетероструктур может уменьшить

количество точечных дефектов, что приводит к росту эффективности фотолюминесценции и уменьшению ее полуширины. **Практическая значимость.** Полученные квантовые точки InGaPAs, а также оригинальный метод их получения могут найти применение при создании источников одиночных фотонов на основе микрорезонаторов. Представленные экспериментальные результаты должны быть учтены при реализации таких источников, в частности при оптимизации ширины и интенсивности линии излучения.

Ключевые слова

квантовые точки, гетероструктуры, молекулярно-пучковая эпитаксия, полупроводники, источники одиночных фотонов

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442 в части низкотемпературных измерений. Исследования влияния быстрого термического отжига осуществлены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Ссылка для цитирования: Андришкин В.В., Драгунова А.С., Комаров С.Д., Надточий А.М., Гладышев А.Г., Бабичев А.В., Уваров А.В., Новиков И.И., Колодезный Е.С., Карачинский Л.Я., Крыжановская Н.В., Неведомский В.Н., Егоров А.Ю., Бугров В.Е. Влияние низких температур и термического отжига на оптические свойства квантовых точек InGaPAs // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 921–928. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-921-928

Influence of low temperatures and thermal annealing on the optical properties of InGaPAs quantum dots

Vladislav V. Andryushkin¹✉, Anna S. Dragunova², Sergey D. Komarov³,
Alexey M. Nadtochiy⁴, Andrey G. Gladyshev⁵, Andrey V. Babichev⁶,
Alexander V. Uvarov⁷, Innokenty I. Novikov⁸, Evgenii S. Kolodezny⁹,
Leonid Ya. Karachinsky¹⁰, Natalia V. Kryzhanovskaya¹¹, Vladimir N. Nevedomskii¹²,
Anton Yu. Egorov¹³, Vladislav E. Bougrov¹⁴

^{1,5,6,8,9,10,14} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{2,3,4,11} HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation

⁷ National Research Academic Alferov University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

⁷ ETU “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

¹² Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹³ Connector Optics LLC, Saint Petersburg, 194292, Russian Federation

¹ vvandriushkin@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

² adragunova@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0181-0262>

³ skomarov@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7025-3527>

⁴ anadtochiy@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>

⁵ andrey.gladyshev@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>

⁶ andrey.babichev@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

⁷ lumenlight@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0061-6687>

⁸ innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

⁹ evgenii_kolodeznyi@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

¹⁰ leonid.karachinsky@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

¹¹ nataliakryzh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4945-9803>

¹² nevedom@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>

¹³ anton.egorov@connector-optics.com, <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

¹⁴ vladislav.bougrov@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>

Abstract

The results of the study of the optical properties of low-density InGaPAs quantum dots, as well as the effect of low temperatures and thermal annealing parameters on their optical and structural properties were presented. InGaPAs quantum dots were formed by substituting phosphorus with arsenic in InGaP layer directly during epitaxial growth. The optical properties of InGaPAs quantum dots were studied by photoluminescence (PL) spectroscopy. Photoluminescence spectra at liquid nitrogen temperature ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) made it possible to determine the features of nonradiative recombination in heterostructures. The heterostructures were subjected to short-term thermal annealing at temperatures of 600 and 650 $^{\circ}\text{C}$ for 2 min to estimate the effect of annealing on the optical and structural properties of quantum dots. It was shown that at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ the contribution of nonradiative recombination can be considered insignificant for the entire measured range of pumping power range but at temperatures above $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$, the contribution of nonradiative Shockley-Reed recombination can be observed. Rapid thermal annealing of InGaPAs quantum dots led to reduce the number of point defects and growth of PL intensity. InGaPAs quantum dots and substitution method can find their application in the creation of single photon sources. The presented experimental results should be considered for implementing such sources, especially for optimizing the width and intensity of the radiation line.

Keywords

quantum dots, heterostructure, molecular-beam epitaxy, semiconductors, single-photon source

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (research project No. 2019-1442) in the part of low temperature measurements. The studies on influence of rapid thermal annealing was implemented in the framework of the Basic Research Program at the HSE University.

For citation: Andryushkin V.V., Dragunova A.S., Komarov S.D., Nadtochiy A.M., Gladyshev A.G., Babichev A.V., Uvarov A.V., Novikov I.I., Kolodeznyi E.S., Karachinsky L.Ya., Kryzhanovskaya N.V., Nevedomskii V.N., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Influence of low temperatures and thermal annealing on the optical properties of InGaPAs quantum dots. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 921–928 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-921-928

Введение

В настоящее время большой интерес представляет создание эффективных и компактных источников одиночных фотонов и матричных микроизлучателей для применения в системах оптической квантовой криптографии [1–5]. Наиболее перспективные наноразмерные объекты на роль таких излучателей — помещенные в микрорезонатор квантовые точки (КТ). Однако к КТ для применения в квантовой криптографии предъявляется требование – малая плотность (менее $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) [6]. В работах [7, 8] показано, что в гетероструктурах, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, при замещении в процессе роста фосфора в тонком слое InGaP на мышьяк происходит формирование низкоплотных КТ, которые перспективны для источников одиночных фотонов [9]. Основываясь на результатах трансмиссионной электронной микроскопии, оценочная плотность КТ составила $1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, пик фотолюминесценции лежал в спектральном диапазоне 952–978 нм при комнатной температуре. Спектральная ширина пика фотолюминесценции, связанного с КТ, обусловлена изменениями толщины слоя InGaP, температуры подложки и времени воздействия в потоке мышьяка во время эпитаксиального роста [7, 8] и не превышала 75 мэВ для комнатной температуры. В настоящей работе представлены подробные исследования оптических свойств гетероструктур с InGaPAs КТ. Показано исследование методом спектроскопии фотолюминесценции излучательных параметров КТ InGaPAs в диапазоне температур от -196 до -27 °С. Выполнен анализ рекомбинационных процессов в исследуемых гетероструктурах. Изучено влияние быстрого термического отжига гетероструктур на их оптические и структурные свойства.

Материалы и методы исследования

Получение образцов. Серия из трех гетероструктур (С1, С2, С3) получена на полуизолирующих подложках GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием промышленной установки Riber 49.

Структуры состоят из буферного слоя GaAs толщиной 100 нм, обкладки GaAs — 200 нм, ограниченной со стороны подложки и поверхности барьерами AlGaAs толщинами по 100 нм. Верхний барьер прикрыт слоем GaAs толщиной 5 нм для предотвращения процесса окисления. В центр обкладки помещен решеточно-согласованный с подложкой слой InGaP. Все структуры выращены при температуре 580 °С. КТ в гетероструктуре сформированы путем замещения атомов фосфора на атомы мышьяка в исходном слое InGaP. Для этого после осаждения слоя InGaP в потоке фосфора происходила остановка роста и замена потока фосфора на поток мышьяка в течение 30 с. Затем выполнена выдержка ростовой поверхности исключительно в потоке мышьяка в течение 5–10 мин, во время которой происходило замещение атомов элементов пятой группы с последующим формированием КТ InGaPAs за счет релаксации растущего напряжения в преобразуемом слое InGaPAs. Выдержка слоя InGaP в потоке мышьяка проведена при температуре 520–535 °С. После этого слой InGaPAs зарастивался прикрывкой GaAs толщиной 5 нм, и происходила остановка роста и подъем температуры подложки до 580 °С в течение 3 мин.

Полученные гетероструктуры имеют отличия друг от друга следующими параметрами: температурой подложки во время роста, толщиной изначального слоя InGaP и временем выдержки гетероструктуры в потоке мышьяка. Время выдержки определено суммой замены атомов элементов пятой группы (0,5 мин) и выдержкой гетероструктуры непосредственно в потоке мышьяка. Значения данных параметров для всех полученных образцов гетероструктур представлены в таблице.

Методы и аппаратура исследования. Проведены исследования эффективности фотолюминесценции в диапазоне температур от -196 до -27 °С. Для низкотемпературных измерений образцы размещены в криостате Janis ST-500, обеспечивающем прецизионный контроль температуры. Возбуждение фотолюминесценции произведено YLF:Nd³⁺ лазером с длиной волны 527 нм. Фокусировка лазера на образец выполнена с помощью линзы 5x Mitutoyo Plan Apo NIR. Спектр фотолюминесценции собран системой фокусирующих линз и детек-

Таблица. Параметры роста гетероструктур

Table. Heterostructures growth parameters

Гетероструктура	Толщина слоя InGaP, нм	Время выдержки, мин	Температура подложки во время выдержки, °С
С1	2,0	5	520
С2	2,0	5 (0,5 + 4,5)	535
С3	3,0	10 (0,5 + 9,5)	535

тирующей системой, которая, в свою очередь, включала монохроматор Sol instruments MS5204i и кремниевый фотодетектор, расположенный на выходе монохроматора. После этого образцы были подвергнуты быстрому термическому отжигу при температурах 600 и 650 °C для исследования влияния отжига на оптические свойства InGaPAs КТ.

Результаты и обсуждение

Спектры фотолюминесценции гетероструктур C1–C3 продемонстрировали схожее поведение при различных температурах. На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции гетероструктур при различных температурах и постоянной мощности оптической накачки равной 4,19 мВт.

Для анализа зависимости интегральной интенсивности (мощности) излучения от уровня возбуждения предположим, что полная скорость излучательной рекомбинации в активной области выражается [10, 11]:

$$P = VBn^2, \tag{1}$$

где V — объем активной области; B — коэффициент излучательной рекомбинации; n — концентрация носителей зарядов.

Коэффициент B не зависит от концентрации носителей зарядов ниже порога инверсии заселенности [12]. Предположим, что имеются три принципиальных канала рекомбинации: излучательная; безызлучательная, линейно зависящая от концентрации носителей зарядов; Оже-рекомбинация. Тогда для полной скорости безызлучательной рекомбинации используем выражение:

$$K = V \left(\frac{n}{\tau_{nr}} + Cn^3 \right), \tag{2}$$

где C — эффективный коэффициент Оже-рекомбинации; τ_{nr} — время безызлучательной рекомбинации Шоккли–Рида.

Примем, что рекомбинация вне активной области пренебрежимо мала, тогда для полного рекомбинационного тока запишем:

$$I = e(P + K), \tag{3}$$

где e — заряд электрона.

Использование линейного детектора мощности и неизменность условий измерений во время эксперимента позволяет относительно легко измерить фиксированную долю излучаемой интенсивности. Основываясь на данном утверждении, интенсивность получим в виде:

$$P_{ext} = RP, \tag{4}$$

где P_{ext} — выходная интегральная интенсивности (измеренная мощность); R — коэффициент пропорциональности между измеренной и излучаемой интенсивностями; P — полная выходная мощность (интегральная интенсивность).

Используя выражения (1)–(4), получим выражение для обратной эффективности спонтанной излучательной рекомбинации:

$$\frac{I}{P_{ext}} = \frac{e}{R} + \left(\frac{e^2 V}{R} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\tau_{nr}^2 B} \right) \left(\frac{1}{P_{ext}} \right)^{1/2} + \left(\frac{e^2}{R^3 V} \right)^{1/2} \left(\frac{C}{B^{3/2}} \right) (P_{ext})^{1/2}. \tag{5}$$

Таким образом, измерение зависимости выходной интегральной интенсивности спонтанного излучения от уровня возбуждения и последующая аппроксимация измеренной зависимости кривой вида (5) позволяют получить информацию о процессах безызлучательной рекомбинации в гетероструктурах C1–C3. На рис. 2 представлены зависимости обратной эффективности спонтанной рекомбинации от корня из выходной интегральной интенсивности для температур 27 °C и –73 °C. Аппроксимация экспериментальных данных кривой

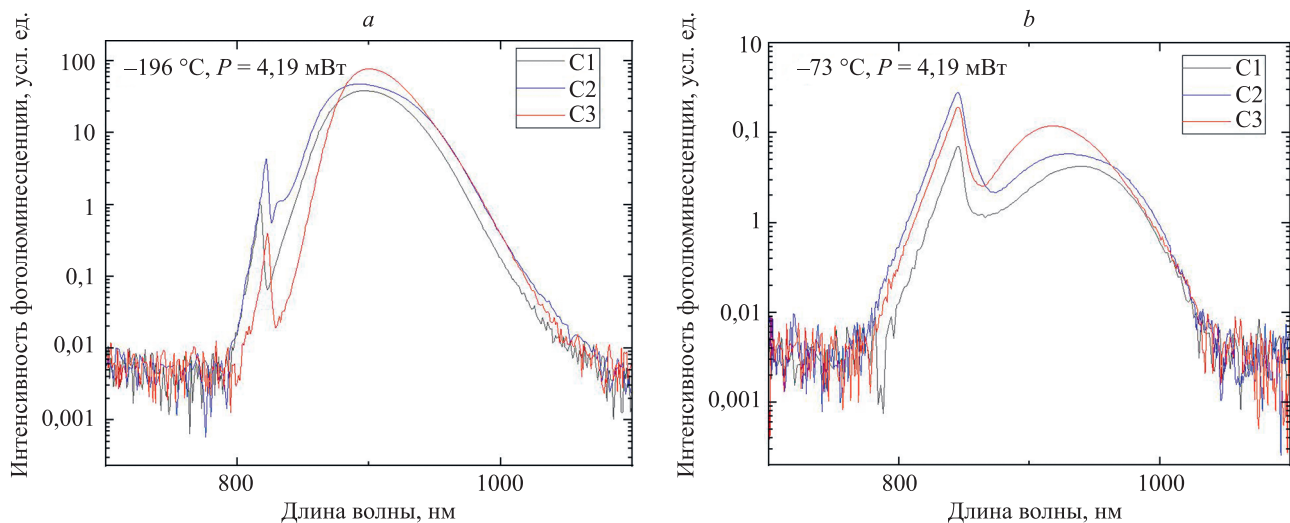


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции гетероструктур C1–C3, полученные при температурах: –196 °C (a) и –73 °C (b)

Fig. 1. PL spectra of C1–C3 heterostructures measured at temperatures –196 °C (a) and –73 °C (b)

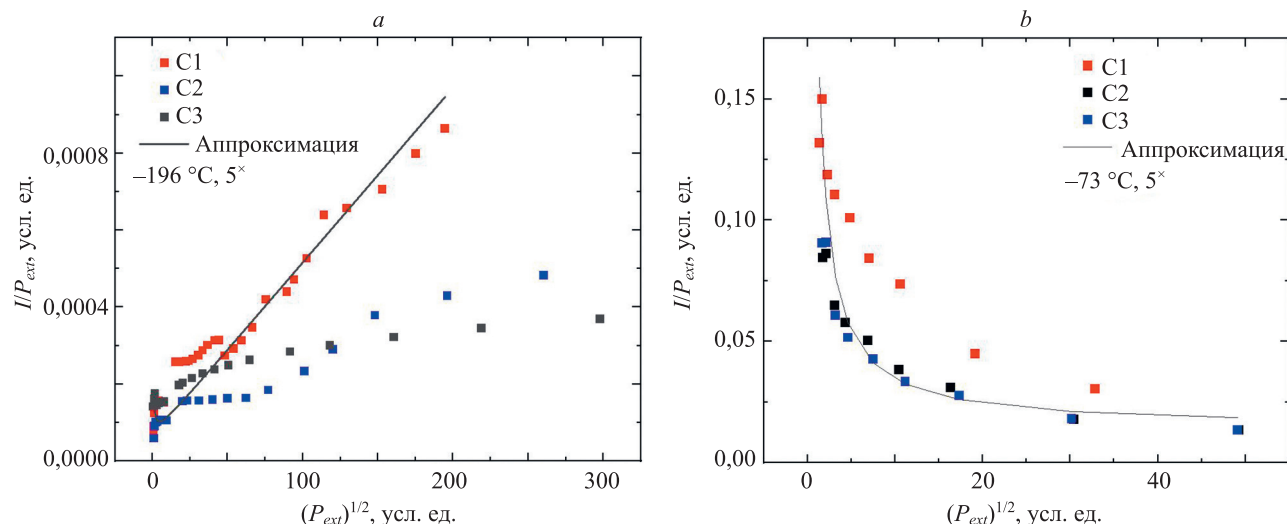


Рис. 2. Зависимость обратной эффективности спонтанной рекомбинации от корня из оптической мощности в гетероструктурах при температурах: -196 °C (a) и -73 °C (b)

Fig. 2. Inverse of the spontaneous recombination efficiency versus the square root of the optical power for heterostructures at -196 °C (a) and -73 °C (b)

вида $A + B/x + Cx$ позволяет вычислить коэффициенты при $(P_{ext})^{1/2}$ и $(P_{ext})^{-1/2}$.

Отметим, что предлагаемая аналитическая модель подразумевает, что все процессы рекомбинации протекают в активной области (КТ), поэтому возможно применить ее только для температур -196 °C и -73 °C из-за довольно высокой интенсивности фотолюминесценции от матрицы GaAs при температуре 27 °C [13, 14]. Основываясь на результатах (рис. 2), видно, что зависимость обратной эффективности спонтанной рекомбинации от корня из оптической мощности при температуре -73 °C хорошо описывается формулой (5), в то время как для температуры -196 °C начальный участок зависимости, который описывает безызлучательную рекомбинацию Шоккли–Рида (τ_{nr}), отсутствует. Для температуры -196 °C (рис. 2, a) аппроксимирующая кривая имеет форму близкую к прямой, что говорит о несущественном вкладе безызлучательной рекомбинации Шоккли–Рида при значениях мощности накачки от 0,6 мВт до 37,5 мВт для всех исследованных гетероструктур. В то же время стоит отметить, что при -73 °C диапазона мощности накачки не хватает, чтобы процессы Оже-рекомбинации возобладали над безызлучательной рекомбинацией Шоккли–Рида и линейные участки зависимости (5) стали бы явно выражены [15].

Потенциально кратковременный быстрый термический отжиг позволяет уменьшить количество точечных дефектов в структуре и тем самым уменьшить вклад безызлучательной рекомбинации [16]. Все исследованные гетероструктуры были подвергнуты дополнительному кратковременному термическому отжигу при температурах 600 и 650 °C в течение 2 мин. Построены зависимости относительного изменения интенсивности (отношение интенсивностей фотолюминесценции после (I_{Ann}) и до (I_0) отжига), и сдвига пика фотолюминесценции от температуры отжига (рис. 3). Отжиг при

температуре 600 °C привел к коротковолновому сдвигу пика фотолюминесценции InGaPAs КТ, а также значительному увеличению интенсивности линии InGaAsP КТ — в три раза для всех гетероструктур.

Для всех гетероструктур после отжига наблюдается уменьшение полуширины линии фотолюминесценции, что говорит о формировании более однородного массива КТ [16]. На рис. 4 представлены спектры фотолюминесценции структуры C2, полученные при комнатной температуре, а также до и после отжига при температурах 600 и 650 °C. Значение полуширины линии фотолюминесценции при комнатной темпера-

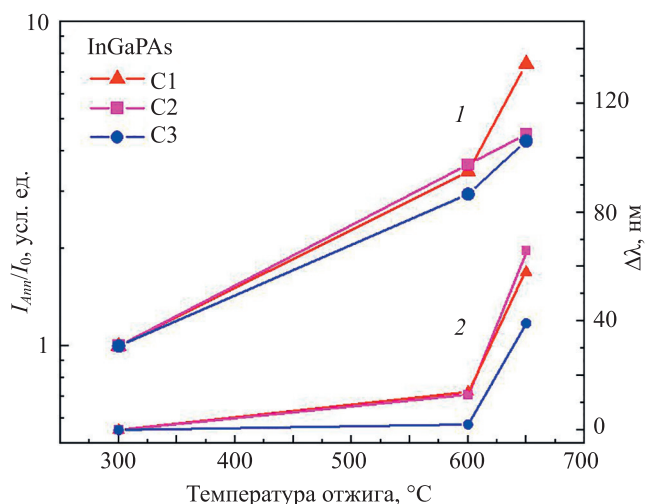


Рис. 3. Относительное изменение интенсивности фотолюминесценции (кривые 1) и относительный сдвиг длины волны ($\Delta\lambda$) максимума излучения для линии островков InGaPAs (кривые 2)

Fig. 3. Relative shifts of the PL peak wavelength (curves 1) and relative changes in the PL intensity of InGaPAs islands (curves 2)

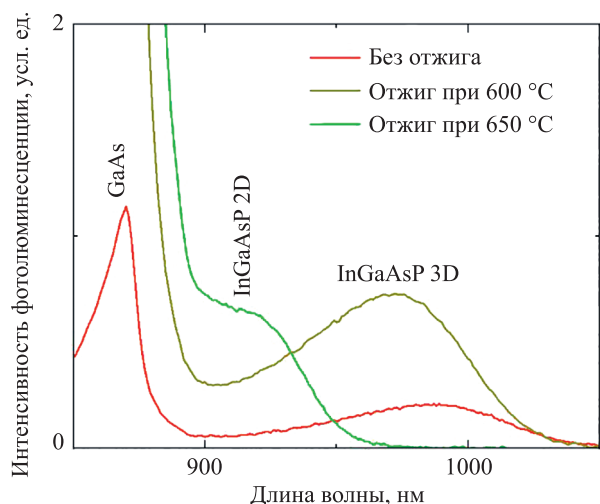


Рис. 4. Спектры фотолуминесценции структуры C2, полученные при комнатной температуре, а также до и после отжига при температурах 600 °C и 650 °C

Fig. 4. PL spectra of C2 heterostructure at room temperature before and after thermal annealing at 600 °C and 650 °C

туре после отжига при 600 °C уменьшилось на 9 мЭВ. Увеличение температуры отжига до 650 °C привело к исчезновению линии излучения InGaPAs/GaAs КТ, что может служить признаком разложения/растворения материала КТ. Основываясь на вышеизложенных данных, можно предположить, что использование метода термического отжига с оптимальными температурными режимами позволит улучшить структурное совершенство низкоплотных КТ для их применения в качестве микроизлучателей в генераторах одиночных фотонов, за счет повышения однородности длины волны излучения.

Литература

1. Michler P., Kiraz A., Becher C., Schoenfeld W.V., Petroff P.M., Zhang L., Huand E., Imamoglu A. A quantum dot single-photon turnstile device // *Science*. 2000. V. 290. N 5500. P. 2282–2285. <https://doi.org/10.1126/science.290.5500.2282>
2. Ward M.B., Karimov O.Z., Unitt D.C., Yuan Z.L., See P., Gevaux D.G., Shields A.J. On-demand single-photon source for 1.3 μm telecom fiber // *Applied Physics Letters*. 2005. V. 86. N 20. P. 201111. <https://doi.org/10.1063/1.1922573>
3. Zinoni C., Alloing B., Monat C., Zwiller V., Li L.H., Fiorec A., Lunghi L., Gerardino A., de Riedmatten H., Zbinden H., Gisin N. Time-resolved and antibunching experiments on single quantum dots at 1300 nm // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. N 13. P. 131102. <https://doi.org/10.1063/1.2190466>
4. Kok P., Munro W.J., Nemoto K., Ralph T.C., Dowling J.P., Milburn G.J. Linear optical quantum computing with photonic qubits // *Reviews of Modern Physics*. 2007. V. 79. N 1. P. 135–174. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.135>
5. Aspuru-Guzik A., Walther P. Photonic quantum simulators // *Nature Physics*. 2012. V. 8. N 4. P. 285–291. <https://doi.org/10.1038/nphys2253>
6. Ustinov V.M., Maleev N.A., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Egorov A.Yu., Lunev A.V., Volovik B.V., Krestnikov I.L., Musikhin Yu.G., Bert N.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D. InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3 μm // *Applied Physics Letters*. 1999. V. 74. N 19. P. 2815–2817. <https://doi.org/10.1063/1.124023>
7. Li Y., Lu H.M. Electron transition energy for vertically coupled InAs/GaAs semiconductor quantum dots and rings // *Japanese Journal of*

Заключение

В работе изучены оптические свойства гетероструктур квантовых точек InGaPAs, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии при замещении фосфора на мышьяк в тонком слое InGaP с использованием подложек GaAs. Показано, что спектры фотолуминесценции всех гетероструктур демонстрируют схожее поведение при различных температурах. Согласно спектрам фотолуминесценции квантовые точки InGaPAs, независимо от режима формирования, излучают в диапазоне длин волн 950–980 нм при температурах в диапазоне от –196 до –27 °C. Для температуры –196 °C аппроксимирующая кривая имеет форму близкую к прямой, что говорит о незначительном вкладе безызлучательной рекомбинации Шоккли–Рида в диапазоне мощности накачки 0,6–37,5 мВт для всех исследованных гетероструктур. При температуре –73 °C диапазона мощности накачки не хватает чтобы процессы Оже-рекомбинации возобладали над безызлучательной рекомбинацией Шоккли–Рида.

Отмечено, что кратковременный отжиг помогает уменьшить количество точечных дефектов и приводит к значительному увеличению интенсивности линии фотолуминесценции InGaAsP квантовых точек. Отжиг при температуре 600 °C привел к коротковолновому сдвигу пика фотолуминесценции InGaPAs КТ, а также значительному увеличению интенсивности фотолуминесценции линии квантовых точек InGaAsP в три раза для всех гетероструктур. Использование метода термического отжига с оптимальными температурными режимами имеет потенциал практического применения для улучшения структурного совершенства и повышения однородности фотолуминесценции низкоплотных InGaAsP квантовых точек.

References

1. Michler P., Kiraz A., Becher C., Schoenfeld W.V., Petroff P.M., Zhang L., Huand E., Imamoglu A. A quantum dot single-photon turnstile device. *Science*, vol. 290, no. 5500, pp. 2282–2285. <https://doi.org/10.1126/science.290.5500.2282>
2. Ward M.B., Karimov O.Z., Unitt D.C., Yuan Z.L., See P., Gevaux D.G., Shields A.J. On-demand single-photon source for 1.3 μm telecom fiber. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, no. 20, pp. 201111. <https://doi.org/10.1063/1.1922573>
3. Zinoni C., Alloing B., Monat C., Zwiller V., Li L.H., Fiorec A., Lunghi L., Gerardino A., de Riedmatten H., Zbinden H., Gisin N. Time-resolved and antibunching experiments on single quantum dots at 1300 nm. *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, no. 13, pp. 131102. <https://doi.org/10.1063/1.2190466>
4. Kok P., Munro W.J., Nemoto K., Ralph T.C., Dowling J.P., Milburn G.J. Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Reviews of Modern Physics*, 2007, vol. 79, no. 1, pp. 135–174. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.135>
5. Aspuru-Guzik A., Walther P. Photonic quantum simulators. *Nature Physics*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 285–291. <https://doi.org/10.1038/nphys2253>
6. Ustinov V.M., Maleev N.A., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Egorov A.Yu., Lunev A.V., Volovik B.V., Krestnikov I.L., Musikhin Yu.G., Bert N.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D. InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3 μm . *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 74, no. 19, pp. 2815–2817. <https://doi.org/10.1063/1.124023>
7. Li Y., Lu H.M. Electron transition energy for vertically coupled InAs/GaAs semiconductor quantum dots and rings. *Japanese Journal of*

- Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers. 2004. V. 43. N 4S. P. 2104–2109. <https://doi.org/10.1143/JJAP.43.2104>
8. Kovsh A.R., Zhukov A.E., Livshits D.A., Egorov A.Yu., Ustinov V.M., Maximov M.V., Musikhin Yu.G., Ledentsov N.N., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D. 3.5 W CW operation of quantum dot laser // *Electronics Letters*. 1999. V. 35. N 14. P. 1161–1163. <https://doi.org/10.1049/el:19990813>
 9. Андриюшкин В.В., Новиков И.И., Гладышев А.А., Карачинский Л.Я., Егоров А.Ю., Бугров В.Е. Полупроводниковая гетероструктура с пониженной поверхностной плотностью квантовых точек. Патент на полезную модель RU209708. Бюл. 2022. № 8.
 10. Shkolnik A.S., Karachinsky L.Ya., Gordeev N.Yu., Zegrya G.G., Evtikhiev V.P., Pellegrinia S., Buller G.S. Observation of the biexponential ground-state decay time behavior in InAs self-assembled quantum dots grown on misoriented substrates // *Applied Physics Letters*. 2005. V. 86. N 21. P. 211112. <https://doi.org/10.1063/1.1938000>
 11. Huang D., Huang P., Lin D., Wang C., Zeng G. High-speed continuous-variable quantum key distribution without sending a local oscillator // *Optics Letters*. 2015. V. 40. N 16. P. 3695–3698. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003695>
 12. Michler P. *Single Semiconductor Quantum Dots*. Berlin: Springer, 2009. 390 p.
 13. Andryushkin V.V., Gladyshev A.G., Babichev A.V., Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Karachinsky L.Ya., Nevedomskii V.N., Egorov A.Yu. Investigation of optical and structural properties of three-dimensional InGaPAs islands formed by substitution of elements of the fifth group // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1697. N 1. P. 012106. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012106>
 14. Gladyshev A.G., Babichev A.V., Andryushkin V.V., Denisov D.V., Nevedomskii V.N., Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu. 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. N 12. P. 2047–2050. <https://doi.org/10.1134/S1063784220120099>
 15. Novikov I.I., Gordeev N.Yu., Maksimov M.V., Shernyakov Yu.M., Semenova E.S., Vasil'ev A.P., Zhukov A.E., Ustinov V.M., Zegrya G.G. Temperature dependence of the effective coefficient of Auger recombination in 1.3 μm InAs/GaAs QD lasers // *Semiconductors*. 2005. V. 39. N 4. P. 481–484. <https://doi.org/10.1134/1.1900267>
 16. Чжень Ч., Бедарев Д.А., Воловик Б.В., Леденцов Н.Н., Лунев А.В., Максимов М.В., Цацальников А.Ф., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Устинов В.М., Копьев П.С. Исследование влияния состава и условий отжига на оптические свойства квантовых точек (In, Ga) As в матрице (Al, Ga) As // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33. № 1. С. 91–96.
 8. Kovsh A.R., Zhukov A.E., Livshits D.A., Egorov A.Yu., Ustinov V.M., Maximov M.V., Musikhin Yu.G., Ledentsov N.N., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D. 3.5 W CW operation of quantum dot laser. *Electronics Letters*, 1999, vol. 35, no. 14, pp. 1161–1163. <https://doi.org/10.1049/el:19990813>
 9. Andriushkin V.V., Novikov I.I., Gladyshev A.A., Karachinskii L.Ia., Egorov A.Iu., Bugrov V.E. Semiconductor heterostructure with reduced quantum dots surface density. *Patent RU209708*. 2022. (in Russian)
 10. Shkolnik A.S., Karachinsky L.Ya., Gordeev N.Yu., Zegrya G.G., Evtikhiev V.P., Pellegrinia S., Buller G.S. Observation of the biexponential ground-state decay time behavior in InAs self-assembled quantum dots grown on misoriented substrates. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, no. 21, pp. 211112. <https://doi.org/10.1063/1.1938000>
 11. Huang D., Huang P., Lin D., Wang C., Zeng G. High-speed continuous-variable quantum key distribution without sending a local oscillator. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 16, pp. 3695–3698. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003695>
 12. Michler P. *Single Semiconductor Quantum Dots*. Berlin, Springer, 2009, 390 p.
 13. Andryushkin V.V., Gladyshev A.G., Babichev A.V., Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Karachinsky L.Ya., Nevedomskii V.N., Egorov A.Yu. Investigation of optical and structural properties of three-dimensional InGaPAs islands formed by substitution of elements of the fifth group. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, no. 1, pp. 012106. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012106>
 14. Gladyshev A.G., Babichev A.V., Andryushkin V.V., Denisov D.V., Nevedomskii V.N., Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu. Studying the optical and structural properties of three-dimensional InGaP (As) islands formed by substitution of elements of the fifth group. *Technical Physics*, 2020, vol. 65, no. 12, pp. 2047–2050. <https://doi.org/10.1134/S1063784220120099>
 15. Novikov I.I., Gordeev N.Yu., Maksimov M.V., Shernyakov Yu.M., Semenova E.S., Vasil'ev A.P., Zhukov A.E., Ustinov V.M., Zegrya G.G. Temperature dependence of the effective coefficient of Auger recombination in 1.3 μm InAs/GaAs QD lasers. *Semiconductors*, 2005, vol. 39, no. 4, pp. 481–484. <https://doi.org/10.1134/1.1900267>
 16. Zhen Z., Bedarev D.A., Volovik B.V., Ledentsov N.N., Lunev A.V., Maksimov M.V., Tsatsul'nikov A.F., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Ustinov V.M., Kop'ev P.S. Influence of composition and anneal conditions on the optical properties of (In, Ga)As quantum dots in an (Al, Ga)As matrix. *Semiconductors*, 1999, vol. 33, no. 1, pp. 80–84. <https://doi.org/10.1134/1.1187651>

Авторы

Андриюшкин Владислав Васильевич — младший 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

Драгунова Анна Сергеевна — младший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург 190008, Российская Федерация, [sc 57205562331](https://orcid.org/0000-0002-0181-0262), <https://orcid.org/0000-0002-0181-0262>, adragunova@hse.ru

Комаров Сергей Дмитриевич — лаборант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург 190008, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7025-3527>, skomarov@hse.ru

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>, anadtochiy@hse.ru

Гладышев Андрей Геннадьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6701588481](https://orcid.org/0000-0002-9448-2471), <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>, andrey.gladyshev@connector-optics.com

Authors

Vladislav V. Andryushkin — Junior 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

Anna S. Dragunova — Junior Researcher, HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation, [sc 57205562331](https://orcid.org/0000-0002-0181-0262), <https://orcid.org/0000-0002-0181-0262>, adragunova@hse.ru

Sergey D. Komarov — Laboratory Assistant, HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7025-3527>, skomarov@hse.ru

Alexey M. Nadtochiy — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation, [sc 26642604500](https://orcid.org/0000-0003-0982-907X), <https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>, anadtochiy@hse.ru

Andrey G. Gladyshev — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6701588481](https://orcid.org/0000-0002-9448-2471), <https://orcid.org/0000-0002-9448-2471>, andrey.gladyshev@connector-optics.com

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>, andrey.babichev@connector-optics.com

Уваров Александр Вячеславович — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; младший научный сотрудник, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация [sc 57196281767](https://orcid.org/0000-0002-0061-6687), <https://orcid.org/0000-0002-0061-6687>, lumenlight@mail.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

Колодезный Евгений Сергеевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56520395600](https://orcid.org/0000-0002-3056-8663), <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>, evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

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>, leonid.karachinsky@connector-optics.com

Крыжановская Наталья Владимировна — доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург 190008, Российская Федерация, [sc 6701651691](https://orcid.org/0000-0002-4945-9803), <https://orcid.org/0000-0002-4945-9803>, nataliakryzh@gmail.com

Неведомский Владимир Николаевич — старший научный сотрудник, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 26536321700](https://orcid.org/0000-0002-7661-9155), <https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>, nevedom@mail.ioffe.ru

Егоров Антон Юрьевич — доктор физико-математических наук, технический директор, ООО «Коннектор Оптик», Санкт-Петербург, 194292, Российская Федерация, [sc 7202362169](https://orcid.org/0000-0002-0789-4241), <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>, anton.egorov@connector-optics.com

Бугров Владислав Евгеньевич — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 8321276100](https://orcid.org/0000-0002-5380-645X), <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>, vladislav.bougrov@niuitmo.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>, andrey.babichev@connector-optics.com

Alexander V. Uvarov — Junior Researcher, National Research Academic Alferov University of the Russian Academy of Sciences; Junior Researcher, ETU “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; [sc 57196281767](https://orcid.org/0000-0002-0061-6687), <https://orcid.org/0000-0002-0061-6687>, lumenlight@mail.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

Evgenii S. Kolodeznyi — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56520395600](https://orcid.org/0000-0002-3056-8663), <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>, evgenii_kolodeznyi@itmo.ru

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>, leonid.karachinsky@connector-optics.com

Natalia V. Kryzhanovskaya — D. Sc. (Physics & Mathematics), Professor, HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation, [sc 6701651691](https://orcid.org/0000-0002-4945-9803), <https://orcid.org/0000-0002-4945-9803>, nataliakryzh@gmail.com

Vladimir N. Nevedomskii — Senior Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 26536321700](https://orcid.org/0000-0002-7661-9155), <https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>, nevedom@mail.ioffe.ru

Anton Yu. Egorov — D. Sc. (Physics & Mathematics), Technical Director, Connector Optics LLC, Saint Petersburg, 194292, Russian Federation, [sc 7202362169](https://orcid.org/0000-0002-0789-4241), <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>, anton.egorov@connector-optics.com

Vladislav E. Bougrov — D. Sc. (Physics & Mathematics), Chief Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 8321276100](https://orcid.org/0000-0002-5380-645X), <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>, vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Статья поступила в редакцию 29.07.2022

Одобрена после рецензирования 22.08.2022

Принята к печати 28.09.2022

Received 29.07.2022

Approved after reviewing 22.08.2022

Accepted 28.09.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»