

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-709-716
УДК 621.373.826

Исследование усилительных свойств активных областей на основе $\text{In}_{0,60}\text{Ga}_{0,40}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$ сверхрешеток, используемых для вертикально-излучающих лазеров

Павел Евгеньевич Копытов¹✉, Владислав Васильевич Андриюшкин²,
Евгений Викторович Пирогов³, Максим Сергеевич Соболев⁴,
Андрей Владимирович Бабичев⁵, Юрий Михайлович Шерняков⁶,
Михаил Викторович Максимов⁷, Андрей Владимирович Лютецкий⁸,
Никита Александрович Пихтин⁹, Леонид Яковлевич Карачинский¹⁰,
Иннокентий Игоревич Новиков¹¹, Си-Конг Тиан¹², Антон Юрьевич Егоров¹³

^{1,2,5,10,11,13} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{3,4} Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^{6,7,8,9} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹² Китайско-германский центр зеленой фотоники им. Бимберга, Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики, Китайская академия наук, Чанчунь, 130033, Китай

¹ kopytovpe@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0008-8345-461X>

² vvandriushkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

³ pirogov_evgenii@spbau.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>

⁴ sobolevms@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>

⁵ a.babichev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

⁶ yuri.shernyakov@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5574-171X>

⁷ maximov@beam.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9251-226X>

⁸ lutetskiy@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6516-0936>

⁹ nike@hpld.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0492-2227>

¹⁰ karachinsky@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

¹¹ innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

¹² tiansicong@ciomp.ac.cn, <https://orcid.org/0009-0001-3610-5993>

¹³ aiegorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

Аннотация

Введение. Исследованы активные области вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм на основе сверхрешеток $\text{In}_{0,60}\text{Ga}_{0,40}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$. Проведено сопоставление пороговых характеристик лазеров с активными областями на основе сильно механически напряженных квантовых ям $\text{In}_{0,74}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,10}\text{As}$. **Метод.** Гетероструктура полосковых лазеров с $\text{In}_{0,60}\text{Ga}_{0,40}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$ сверхрешеткой получена методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Меза-структура полосковых лазеров сформирована методом селективного жидкостного травления с последующим нанесением омических контактов. Формирование полосковых лазеров с различной длиной резонатора выполнено методом ручного скальвания зеркал. Измерение выходных характеристик лазеров проведено в импульсном режиме с использованием калиброванного германиевого фотодиода большой площади, а спектральных характеристик — с помощью спектрофотометра на основе монохроматора. **Основные результаты.** Достигнутые пороговые характеристики (модальное усиление 40 см^{-1} , плотность тока прозрачности 650 А/см^2 , внутренние оптические потери 8 см^{-1}) полосковых лазеров, на основе сверхрешеток $\text{In}_{0,60}\text{Ga}_{0,40}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$ с низкой степенью рассогласования кристаллической решетки слоев InGaAs сопоставимы с пороговыми характеристиками лазеров на основе активных областей с сильно механически-напряженными квантовыми ямами $\text{In}_{0,74}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,10}\text{As}$. Характеристические температуры T_0 и T_1 составили 60 К и 87 К для полосковых лазеров с длиной резонатора 1 мм. Повышение частоты малосигнальной модуляции вертикально-излучающих лазеров и их температурной стабильности связано с использованием сильно механически-напряженных $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,21}\text{As}$ сверхрешеток. **Обсуждение.** Предложенные

© Копытов П.Е., Андриюшкин В.В., Пирогов Е.В., Соболев М.С., Бабичев А.В., Шерняков Ю.М., Максимов М.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Тиан Си-Конг, Егоров А.Ю., 2024

активные области на основе InGaAs-InP сверхрешеток могут найти применение при разработке вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм. Результаты работы могут быть реализованы при создании экспериментальных образцов и оптимизации модуляционных параметров вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм.

Ключевые слова

сверхрешетка, вертикально-излучающий лазер, активная область, усиление, арсенид индия-галлия, арсенид индия-алюминия-галлия

Благодарности

Работа выполнена в рамках совместного российско-китайского проекта. Российская сторона благодарит за поддержку Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий № 075-15-2023-579 от 11 августа 2023 года), китайская сторона — National Key R&D Program of China (2023YFE0111200).

Ссылка для цитирования: Копытов П.Е., Андриюшкин В.В., Пирогов Е.В., Соболев М.С., Бабичев А.В., Шерняков Ю.М., Максимов М.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Тиан Си-Конг, Егоров А.Ю. Исследование усилительных свойств активных областей на основе $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ сверхрешеток, используемых для вертикально-излучающих лазеров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 709–716. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-709-716

Gain characteristics of $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ superlattice active regions for vertical-cavity surface-emitting lasers

Pavel E. Kopytov¹✉, Vladislav V. Andriushkin², Evgeniy V. Pirogov³, Maxim S. Sobolev⁴, Andrey V. Babichev⁵, Yuri M. Shernyakov⁶, Mikhail V. Maximov⁷, Andrey V. Lyutetskiy⁸, Nikita A. Pikhtin⁹, Leonid Ya. Karachinsky¹⁰, Innokenty I. Novikov¹¹, Sicong Tian¹², Anton Yu. Egorov¹³

^{1,2,5,10,11,13} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{3,4} Alferov University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^{6,7,8,9} Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹² Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics, Changchun, 130033, China

¹ kopytovpe@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0008-8345-461X>

² vvandriushkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

³ pirogov_evgenii@spbau.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>

⁴ sobolevsms@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>

⁵ a.babichev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

⁶ yuri.shernyakov@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5574-171X>

⁷ maximov@beam.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9251-226X>

⁸ lutetskiy@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6516-0936>

⁹ nika@hpld.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0492-2227>

¹⁰ lkarachinsky@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

¹¹ innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

¹² tiansicong@ciomp.ac.cn, <https://orcid.org/0009-0001-3610-5993>

¹³ aiegorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

Abstract

The results of investigation of the gain properties of 1300 nm vertical-cavity surface-emitting lasers active regions based on $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ superlattices and threshold characteristics comparison of superlattices and highly lattice mismatched $\text{In}_{0.74}\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ quantum wells are presented. The heterostructure of injection lasers with an $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ superlattice was grown by molecular beam epitaxy. Mesa structure of injection lasers was obtained by selective liquid etching followed by the application of ohmic contacts. The formation of injection lasers with various cavity lengths is performed using the method of manually cleaving mirrors. The output characteristics were measured in a pulsed mode using a large area calibrated germanium photodiode. Spectral characteristics were measured using a spectrophotometer based on monochromator. The achieved threshold characteristics (modal gain about 40 cm^{-1} , transparency current density about 650 A/cm^2 , internal optical losses about 8 cm^{-1}) of injection lasers based on $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ superlattices with low lattice mismatch InGaAs layers are comparable to previously presented lasers based on active regions with strongly strained $\text{In}_{0.74}\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ quantum wells. The characteristic temperatures T_0 and T_1 were 60 K and 87 K for injection lasers with a cavity length of 1 mm. An increase in the frequency of small-signal modulation of vertical-cavity surface-emitting lasers and their temperature stability is associated with the use of highly strained $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.21}\text{As}$ superlattices. The proposed active regions based on InGaAs-InP superlattices have the potential to be used in the development of vertical-cavity surface-emitting lasers in the 1300 nm spectral range. The findings of this work can be applied in the realization of experimental species and optimization of modulation parameters for vertical-cavity lasers operating in the 1300 nm wavelength range.

Keywords

superlattice, vertical-cavity surface-emitting laser, active region, gain, indium gallium arsenide, indium aluminium gallium arsenide

Acknowledgements

The results were obtained within Russian-Chinese project, with the financial support of the Russian side by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant agreement in the form of a subsidy from the federal budget No. 075-15-2023-579 dated August 11, 2023) and with the financial support of the Chinese side by the National Key R&D Program of China (2023YFE0111200).

For citation: Kopytov P.E., Andryushkin V.V., Pirogov E.V., Sobolev M.S., Babichev A.V., Shernyakov Y.M., Maximov M.V., Lyutetskiy A.V., Pikhtin N.A., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Tian Sicong, Egorov A.Yu. Gain characteristics of $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ superlattice active regions for vertical-cavity surface-emitting lasers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 709–716 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-709-716

Введение

В качестве активных областей полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1300 нм традиционно рассматриваются квантовые ямы InGaAsP и InAlGaAs [1], выращенные на подложках фосфида индия (InP). Несмотря на тот факт, что носители заряда в InGaAsP квантовых ямах имеют более высокую скорость излучательной рекомбинации в сравнении с InAlGaAs квантовыми ямами [1], температурная стабильность вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) на их основе более низкая. Значительный тепловой выброс носителей заряда, обусловленный малым разрывом зоны на гетерогранице, ограничивает температурную стабильность ВИЛ на основе InGaAsP квантовых ям [2]. Значительное изменение Оже-рекомбинации и дифференциального усиления с температурой также свойственно для системы материалов InGaAsP-InP [3].

InAlGaAs квантовые ямы традиционно используются в качестве активной области длинноволновых ВИЛ спектрального диапазона 1300–1550 нм: монокристаллических [4–6], гибридных [7–9], а также ВИЛ, полученных по технологии спекания пластин [10–12]. Основным недостатком применения InAlGaAs квантовых ям при формировании ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм является высокая мольная доля алюминия (около 18 %), что в два раза превышает аналогичную величину для InAlGaAs квантовых ям спектрального диапазона 1550 нм [13, 14]. Как результат, наблюдается увеличение пороговых токов ВИЛ за счет рекомбинации Шокли–Рида–Холла [15].

Альтернативный подход при формировании ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм состоит в использовании InGaAs-InP сверхрешеток. Из преимуществ данного подхода следует отметить: отсутствие алюминия в слоях квантовых ям, что позволяет снизить пороговые токи ВИЛ [16]; увеличение фактора оптического ограничения за счет формирования минизоны в связанных квантовых ямах, что позволяет повысить величину модального усиления [17]; снижение энергетического положения минизоны в сравнении с несвязанными InGaAs квантовыми ямами, что дает возможность увеличить температурную стабильность лазера [18].

В работе [16] реализованы высокоэффективные ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм с активной областью на основе $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ сверхрешетки. Продемонстрирована высокая выходная оптическая мощность в одночастотном режиме генерации (около 6 мВт) и низкие внутренние оптические

потери (около 3 см^{-1}), что свидетельствует об эффективности использования InGaAs-InP сверхрешетки в качестве активной области ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм. Проведена оценка пороговых характеристик ВИЛ с различной величиной оптических потерь на вывод излучения. Продемонстрирована высокая величина модального усиления (30 см^{-1}) и низкое значение плотности тока прозрачности (630 А/см^2) [16]. Однако данные значения соответствуют температуре 333 К (температуре нулевого рассогласования между максимумом спектра усиления и положением резонансной длины вертикального микрорезонатора).

Цель настоящей работы — оценка усилительных свойств активных областей на основе $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ сверхрешеток при комнатной температуре (293 К), что было реализовано за счет исследования пороговых характеристик полосковых лазеров с активной областью, идентичной используемой в ВИЛ [16].

Экспериментальные образцы и методы исследования характеристик

Для проведения эксперимента была выращена гетероструктура полосковых лазеров методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 49. Слой n -эмиттера на основе $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}:\text{Si}$ толщиной 200 нм и уровнем легирования $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ сформирован на подложке из InP , легированной серой до уровня $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Активная область располагалась между двух волноводных слоев $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ толщиной 100 нм. Использование сверхрешетки на основе 25 периодов слоев $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ с толщинами 0,8 и 2 нм соответственно обеспечило фотолюминесценцию при температуре 293 К с пиком в области 1290 нм. Слой p -эмиттера с суммарной толщиной 1500 нм включал три слоя $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}:\text{C}$ толщиной 500 нм с уровнями легирования $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Контактный слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}:\text{C}$ с толщиной 150 нм и уровнем легирования $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ образован после слоя эмиттера.

Меза-структура полоскового лазера создана методом жидкостного травления с последующим формированием омических контактов после утонения пластины. Ширина полосковых лазеров составила 400 мкм, ширина области токового контакта — 100 мкм. Полосковые лазеры с различной длиной резонатора получены методом ручного скалывания зеркал.

Измерения выходных характеристик полосковых лазеров (вольт- и ватт-амперных характеристик) про-

водились в импульсном режиме (длительность импульса 300 нс, частота повторения 4 кГц) в диапазоне температур 293–353 К. Пороговые токи и внешняя квантовая эффективность измерялись с использованием калиброванного германиевого фотодиода большой площади (диаметром 10 мм). Спектральные измерения выполнены с помощью спектрофотометра на основе монохроматора.

Результаты и обсуждение

На рис. 1, *a* представлена зависимость обратной внешней квантовой эффективности лазеров (η_{ext}) от обратной величины потерь на зеркалах (α_m). Величина η_{ext} определена с учетом спектрального положения максимума спектра многомодовой генерации (вставка к рис. 1, *a*) и полной крутизны ватт-амперной характеристики лазера. В результате вычисления получено значение η_{ext} для полосковых лазеров с длиной резонатора 1 мм, составившее около 21 %. Проведена аппроксимация экспериментальных данных для полосковых лазеров с различной длиной резонатора на основе выражения $1/\eta_{ext} = (\alpha_w/\alpha_m + 1)/\eta_i$, где η_i — внутренняя эффективность лазера; α_w — потери в волноводе.

Определены внутренняя эффективность лазера и величина оптических потерь в волноводе, которые составили 36 % и 8 см^{-1} . На рис. 1, *b* показана зависимость пороговой плотности тока полосковых лазеров (j_{th}) от α_m . Проведена аппроксимация экспериментальных данных

на основе выражения [16]: $j_{th} = j_{tr}/\eta_i \exp((\alpha_w + \alpha_m)/G_m)$, где G_m — величина модального усиления на пороге генерации; j_{tr} — плотность тока прозрачности. Определены модальное усиление и плотность тока прозрачности, которые составили 40 см^{-1} и 650 А/см^2 .

В работе [3] показано, что использование сильно механически-напряженных $\text{In}_{0,74}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,10}\text{As}$ квантовых ям (степень рассогласования квантовых ям по постоянной кристаллической решетке с материалом подложки составила 1,4 %) позволило реализовать модальное усиление около 43 см^{-1} , величину плотности тока прозрачности на уровне 680 А/см^2 при величине оптических потерь в волноводе около 8 см^{-1} [3]. На рис. 1, *b* приведено сопоставление модального усиления от уровня токовой накачки (на основе выражения $G = G_m(\ln(\eta_i/j_{tr}))$) для исследованных полосковых лазеров с активной областью на основе сверхрешетки с результатами, представленными в работе [3]. Сравнение полученных в настоящей работе пороговых характеристик лазеров с результатами, полученными для полосковых лазеров спектрального диапазона 1300 нм с активной областью на основе InAlGaAs-InP квантовых ям [3], показало, что использование сильно механически-напряженных InAlGaAs-InP квантовых ям позволяет повысить величину дифференциального усиления.

Проведены исследования характеристических температур T_0 и T_1 полосковых лазеров с длиной резонатора 1 мм в зависимости от температуры (рис. 2). Величина

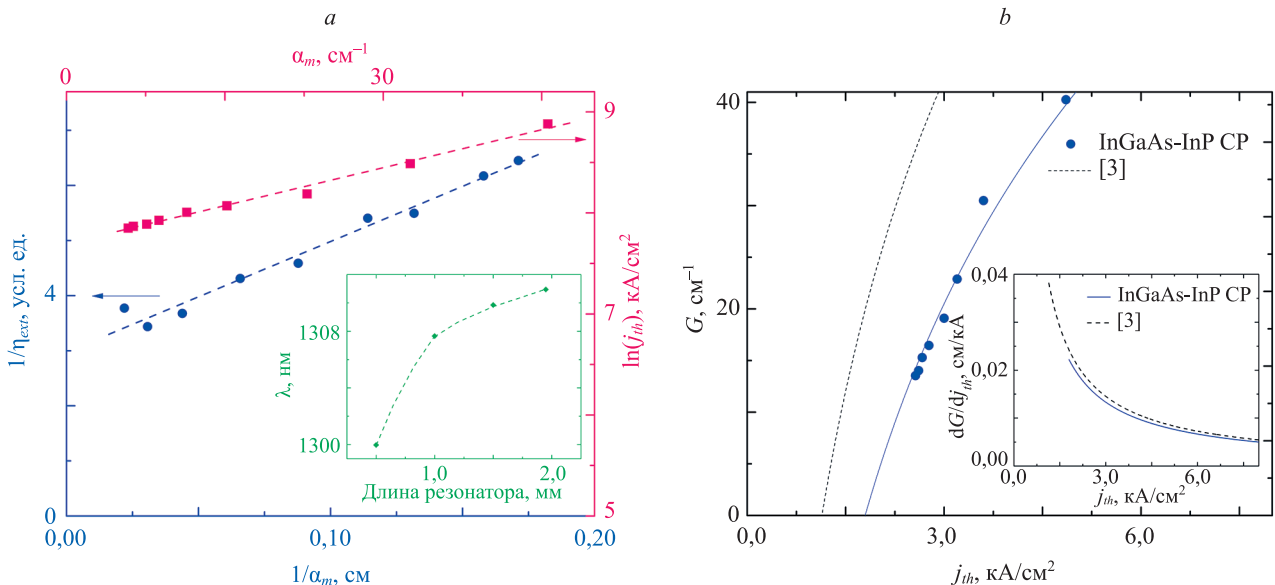


Рис. 1. Зависимости обратной квантовой эффективности от обратных оптических потерь на зеркалах и плотности порогового тока от уровня оптических потерь на зеркалах. На вставке приведена зависимость длины волны (λ) лазерной генерации в зависимости от длины резонатора (*a*). Значения модального усиления в зависимости от величины плотности порогового тока, полученные экспериментально (синие точки), с результатами аппроксимации (сплошная линия) и результат аппроксимации для пороговых характеристик полосковых лазеров с InAlGaAs-InP квантовыми ямами [3] (пунктирная кривая). На вставке приведены значения первой производной $G(j_{th})$ в зависимости от пороговой плотности тока (*b*)

Fig. 1. The dependence of the inverse quantum efficiency vs. the inverse optical losses on the mirrors, and the dependence of the threshold current density vs. the level of optical losses on the mirrors. The insert demonstrates dependence of the lasing wavelength (λ) vs. cavity length (*a*). The values of the modal gain depending from the threshold current density obtained experimentally along with the approximation results (solid line). The dotted curve is the result of the approximation for the threshold characteristics of injection lasers with InAlGaAs-InP quantum wells, presented in [3]. The insert demonstrates the values of the first derivative of the $G(j_{th})$ vs. threshold current density (*b*)

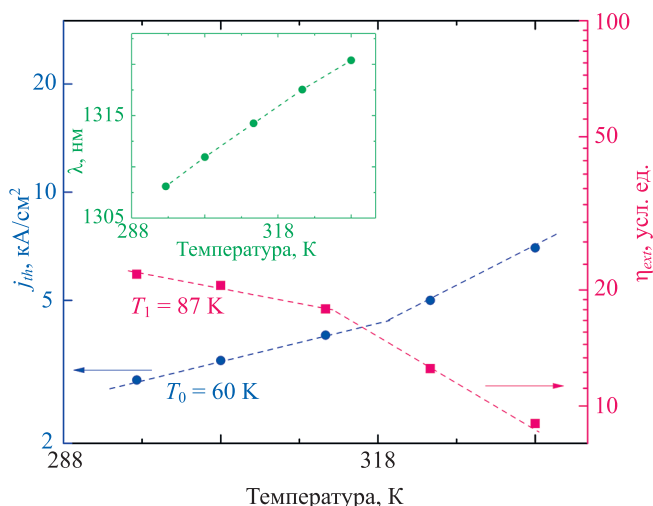


Рис. 2. Зависимость плотности порогового тока (j_{th}) и внешней квантовой эффективности (η_{ext}) полоскового лазера с длиной резонатора 1 мм от температуры. На вставке приведена зависимость длины волны лазерной генерации в зависимости от температуры

Fig. 2. Temperature dependences of the threshold current density (j_{th}) and the external quantum efficiency (η_{ext}) of an injection laser with a resonator length of 1 mm. The insert shows dependence of the lasing wavelength vs. temperature

характеристической температуры T_0 , определяемая по экспоненциальному росту плотности порогового тока с температурой ($j_{th} = j_0 \cdot \exp(T/T_0)$ [19]), составила 60 К в диапазоне температур 293–318 К. Дальнейшее повышение температуры привело к изменению наклона зависимости $\ln(j_{th}(T))$. Характеристическая температура T_1 , определяемая по экспоненциальному спаду внешней квантовой эффективности с температурой ($\eta_{ext} = \eta_0 \exp(-T/T_1)$ [19]), составила 87 К в диапазоне температур 293–313 К. В работе [3] показано, что для полосковых лазеров спектрального диапазона 1300 нм с активной областью на основе InAlGaAs-InP квантовых ям значения характеристических температур T_0 и T_1 составляют 81 К и 340 К [3].

Выполненная оценка энергетического положения минизоны в исследованной сверхрешетке на основе метода, описанного в работе [20], показала, что нижняя граница минизоны расположена на 89 мэВ, а верх-

няя — на 23 мэВ ниже положения барьерного слоя $\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$. При этом оценка положения электронных уровней для $\text{In}_{0,74}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,10}\text{As}$ квантовых ям толщиной 5 нм, разделенных $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,32}\text{Ga}_{0,16}\text{As}$ барьерами толщиной 10 нм [3], показывает, что в зоне проводимости наблюдается два электронных уровня, расположенных на энергетических расстояниях в 45 и 270 мэВ относительно положения барьерного слоя. Таким образом, можно сделать вывод о том, что значительный тепловой выброс носителей заряда для исследованной конструкции сверхрешетки определяет меньшие значения характеристической температуры T_0 в сравнении с результатами для активных областей на основе «толстых» InAlGaAs квантовых ям, в которых электронные уровни расположены на значительном удалении от положения барьера. В свою очередь, большие значения характеристической температуры T_1 , продемонстрированные для InAlGaAs-InP квантовых ям, преимущественно определяются наличием дополнительных ограничивающих слоев в конструкции волновода [3], которые не используются при формировании микрорезонатора ВИЛ.

Заключение

Проведена оценка усилительных свойств активных областей на основе $\text{In}_{0,60}\text{Ga}_{0,40}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$ сверхрешеток при комнатной температуре 293 К. Показано, что использование данных сверхрешеток с низкой степенью рассогласования по постоянной кристаллической решетки слоев InGaAs (порядка 0,5 %) относительно материала подложки обеспечивает модальное усиление, плотность тока прозрачности и величину внутренних оптических потерь, сопоставимые с аналогичными пороговыми характеристиками, полученными для полосковых лазеров на основе сильно механически-напряженных $\text{In}_{0,74}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,10}\text{As}$ квантовых ям (степень рассогласования порядка 1,4 %) [3]. С учетом того, что частота малосигнальной модуляции вертикально-излучающих лазеров прямо пропорциональна дифференциальному усилению, а температурная стабильность лазера определяется преимущественно надбарьерным выбросом носителей заряда, дальнейшие исследования будут направлены на создание активных областей на основе сильно механически-напряженных сверхрешеток.

Литература

- Grasse C., Mueller M., Gruendl T., Boehm G., Roenneberg E., Wiecha P., Roskopf J., Ortsiefer M., Meyer R., Amann M.-C. AlGaInAsPSb-based high-speed short-cavity VCSEL with single-mode emission at 1.3 μm grown by MOVPE on InP substrate // Journal of Crystal Growth. 2016. V. 370. P. 217–220. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.06.051>
- Camargo Silva M.T., Sih J.P., Chou T.M., Kirk J.K., Evans G.A., Butler J.K. 1.3 μm strained MQW AlGaInAs and InGaAsP ridge-waveguide lasers—a comparative study // Proc. of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. V. 1. 1999. P. 10–12. <https://doi.org/10.1109/IMOC.1999.867027>
- Savolainen P., Toivonen M., Orsila S., Saarinen M., Melanen P., Vilokinen V., Dumitrescu M., Panarello T., Pessa M. AlGaInAs/InP strained-layer quantum well lasers at 1.3 μm grown by solid source

References

- Grasse C., Mueller M., Gruendl T., Boehm G., Roenneberg E., Wiecha P., Roskopf J., Ortsiefer M., Meyer R., Amann M.-C. AlGaInAsPSb-based high-speed short-cavity VCSEL with single-mode emission at 1.3 μm grown by MOVPE on InP substrate. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 370, pp. 217–220. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.06.051>
- Camargo Silva M.T., Sih J.P., Chou T.M., Kirk J.K., Evans G.A., Butler J.K. 1.3 μm strained MQW AlGaInAs and InGaAsP ridge-waveguide lasers—a comparative study. *Proc. of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. V. 1*, 1999, pp. 10–12. <https://doi.org/10.1109/IMOC.1999.867027>
- Savolainen P., Toivonen M., Orsila S., Saarinen M., Melanen P., Vilokinen V., Dumitrescu M., Panarello T., Pessa M. AlGaInAs/InP strained-layer quantum well lasers at 1.3 μm grown by solid source

- molecular beam epitaxy // *Journal of Electronic Materials*, 1999, vol. 28, no. 8, pp. 980–985. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0208-6>
4. Park M.-R., Kwon O.-K., Han W.-S., Lee K.-H., Park S.-J., Yoo B.-S. All-epitaxial InAlGaAs-InP VCSELs in the 1.3-1.6- μm wavelength range for CWDM band applications // *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, vol. 18, no. 16, pp. 1717–1719. <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.879940>
 5. Jewell J., Graham L., Crom M., Maranowski K., Smith J., Fanning T., Schnoes M. Commercial GaInNAs VCSELs grown by MBE // *Physica Status Solidi C*, 2008, vol. 5, no. 9, pp. 2951–2956. <https://doi.org/10.1002/pssc.200779295>
 6. Naone R.L., Jackson A.W., Feld S.A., Galt D., Malone K.J., Hindi J.J. Monolithic GaAs-based 1.3 μm VCSEL directly-modulated at 10 Gb/s // *Proc. of the Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest (IEEE Cat. No.01CH37170)*, 2001, p. CPD13-CP1. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2001.948231>
 7. Boehm G., Ortsiefer M., Shau R., Rosskopf J., Lauer C., Maute M., Köhler F., Mederer F., Meyer R., Amann M.-C. InP-based VCSEL technology covering the wavelength range from 1.3 to 2.0 μm // *Journal of Crystal Growth*, 2003, vol. 251, no. 1-4, pp. 748–753. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)02193-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)02193-0)
 8. Hofmann W., Müller M., Wolf P., Mutig A., Gründl T., Böhm G., Bimberg D., Amann M.-C. 40 Gbit/s modulation of 1550 nm VCSEL // *Electronics Letters*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 270–271. <https://doi.org/10.1049/el.2010.3631>
 9. Grundl T., Debernardi P., Muller M., Grasse C., Ebert P., Geiger K., Ortsiefer M., Bohm G., Meyer R., Amann M.-C. Record single-mode, high-power VCSELs by inhibition of spatial hole burning // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, vol. 19, no. 4, p. 1700913. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2244572>
 10. Wolf P., Li H., Caliman A., Mereuta A., Iakovlev V., Sirbu A., Kapon E., Bimberg D. Spectral efficiency and energy efficiency of pulse-amplitude modulation using 1.3 μm wafer-fusion VCSELs for optical interconnects // *ACS Photonics*, 2017, vol. 4, no. 8, pp. 2018–2024. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00403>
 11. Zhang J., Hao C., Zheng W., Bimberg D., Liu A. Demonstration of electrically injected vertical-cavity surface-emitting lasers with post-supported high-contrast gratings // *Photonics Research*, 2022, vol. 10, no. 5, pp. 1170–1176. <https://doi.org/10.1364/PRJ.447633>
 12. Rapp S., Salomonsson F., Streubel K., Mogg S., Wennekes F., Bentell J., Hammar M. All-epitaxial single-fused 1.55 μm vertical cavity laser based on an InP Bragg reflector // *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 38, no. 2S, p. 1261. <https://doi.org/10.1143/JJAP.38.1261>
 13. Müller M., Grasse C., Amann M.C. InP-based 1.3 μm and 1.55 μm short-cavity VCSELs suitable for telecom- and datacom-applications // *Proc. of the 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2012, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icton.2012.6254394>
 14. Sirbu A., Caliman A., Mereuta A., Iakovlev V., Suruceanu G., Kapon E. Recent progress in wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band // *Proc. of the 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2011, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2011.5970822>
 15. Novikov I.I., Nadtochiy A.M., Potapov A.Yu., Gladyshev A.G., Kolodeznyi E.S., Rochas S.S., Babichev A.V., Andryushkin V.V., Denisov D.V., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Influence of the doping type on the temperature dependencies of the photoluminescence efficiency of InGaAlAs/InGaAs/InP heterostructures // *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 239, p. 118393. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118393>
 16. Blokhin S.A., Babichev A.V., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Blokhin A.A., Bobrov M.A., Maleev N.A., Andryushkin V.V., Denisov D.V., Voropaev K.O., Zhumaeva I.O., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Ledentsov N.N. High power single mode 1300-nm superlattice based VCSEL: Impact of the buried tunnel junction diameter on performance // *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, vol. 58, no. 2, p. 2400115. <https://doi.org/10.1109/JQE.2022.3141418>
 17. Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Колодезный Е.С., Рочас С.С., Курочкин А.С., Бобрецова Ю.К., Климов А.А., Денисов Д.В., Ворopaев К.О., Ионов А.С., Бугров В.Е., Егоров А.Ю. Оптическое усиление в лазерных гетероструктурах с активной областью на основе короткопериодной сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs // *Оптика и спектроскопия*, 2019, vol. 28, no. 8, pp. 980–985. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0208-6>
 4. Park M.-R., Kwon O.-K., Han W.-S., Lee K.-H., Park S.-J., Yoo B.-S. All-epitaxial InAlGaAs-InP VCSELs in the 1.3-1.6- μm wavelength range for CWDM band applications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, vol. 18, no. 16, pp. 1717–1719. <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.879940>
 5. Jewell J., Graham L., Crom M., Maranowski K., Smith J., Fanning T., Schnoes M. Commercial GaInNAs VCSELs grown by MBE. *Physica Status Solidi C*, 2008, vol. 5, no. 9, pp. 2951–2956. <https://doi.org/10.1002/pssc.200779295>
 6. Naone R.L., Jackson A.W., Feld S.A., Galt D., Malone K.J., Hindi J.J. Monolithic GaAs-based 1.3 μm VCSEL directly-modulated at 10 Gb/s. *Proc. of the Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest (IEEE Cat. No.01CH37170)*, 2001, pp. CPD13-CP1. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2001.948231>
 7. Boehm G., Ortsiefer M., Shau R., Rosskopf J., Lauer C., Maute M., Köhler F., Mederer F., Meyer R., Amann M.-C. InP-based VCSEL technology covering the wavelength range from 1.3 to 2.0 μm . *Journal of Crystal Growth*, 2003, vol. 251, no. 1-4, pp. 748–753. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)02193-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)02193-0)
 8. Hofmann W., Müller M., Wolf P., Mutig A., Gründl T., Böhm G., Bimberg D., Amann M.-C. 40 Gbit/s modulation of 1550 nm VCSEL. *Electronics Letters*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 270–271. <https://doi.org/10.1049/el.2010.3631>
 9. Grundl T., Debernardi P., Muller M., Grasse C., Ebert P., Geiger K., Ortsiefer M., Bohm G., Meyer R., Amann M.-C. Record single-mode, high-power VCSELs by inhibition of spatial hole burning. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, vol. 19, no. 4, p. 1700913. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2244572>
 10. Wolf P., Li H., Caliman A., Mereuta A., Iakovlev V., Sirbu A., Kapon E., Bimberg D. Spectral efficiency and energy efficiency of pulse-amplitude modulation using 1.3 μm wafer-fusion VCSELs for optical interconnects. *ACS Photonics*, 2017, vol. 4, no. 8, pp. 2018–2024. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00403>
 11. Zhang J., Hao C., Zheng W., Bimberg D., Liu A. Demonstration of electrically injected vertical-cavity surface-emitting lasers with post-supported high-contrast gratings. *Photonics Research*, 2022, vol. 10, no. 5, pp. 1170–1176. <https://doi.org/10.1364/PRJ.447633>
 12. Rapp S., Salomonsson F., Streubel K., Mogg S., Wennekes F., Bentell J., Hammar M. All-epitaxial single-fused 1.55 μm vertical cavity laser based on an InP Bragg reflector. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 38, no. 2S, pp. 1261. <https://doi.org/10.1143/JJAP.38.1261>
 13. Müller M., Grasse C., Amann M.C. InP-based 1.3 μm and 1.55 μm short-cavity VCSELs suitable for telecom- and datacom-applications. *Proc. of the 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2012, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icton.2012.6254394>
 14. Sirbu A., Caliman A., Mereuta A., Iakovlev V., Suruceanu G., Kapon E. Recent progress in wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band. *Proc. of the 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2011, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2011.5970822>
 15. Novikov I.I., Nadtochiy A.M., Potapov A.Yu., Gladyshev A.G., Kolodeznyi E.S., Rochas S.S., Babichev A.V., Andryushkin V.V., Denisov D.V., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Influence of the doping type on the temperature dependencies of the photoluminescence efficiency of InGaAlAs/InGaAs/InP heterostructures. *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 239, pp. 118393. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118393>
 16. Blokhin S.A., Babichev A.V., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Blokhin A.A., Bobrov M.A., Maleev N.A., Andryushkin V.V., Denisov D.V., Voropaev K.O., Zhumaeva I.O., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Ledentsov N.N. High power single mode 1300-nm superlattice based VCSEL: Impact of the buried tunnel junction diameter on performance. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 2400115. <https://doi.org/10.1109/JQE.2022.3141418>
 17. Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Babichev A.V., Gladyshev A.G., Kolodeznyi E.S., Rochas S.S., Kurochkin A.S., Bobretsova Yu.K., Klimov A.A., Denisov D.V., Voropaev K.O., Ionov A.S., Bougrov V.E., Egorov A.Yu. Optical gain in laser heterostructures with an active area based on an InGaAs/InGaAlAs superlattice. *Optics*

- T. 127. № 6. С. 963–966. <https://doi.org/10.21883/OS.2019.12.48693.124-19>
18. Блохин С.А., Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Блохин А.А., Бобров М.А., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Надточий А.М., Неведомский В.Н., Андриюшкин В.В., Рочас С.С., Денисов Д.В., Воропаев К.О., Жумаева И.О., Устинов В.М., Егоров А.Ю., Бугров В.Е. Исследование характеристик сверхрешетки InGaAs/InAlGaAs для вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 nm // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 12. С. 2008–2017. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51767.240-21>
 19. Зубов Ф.И., Семенова Е.С., Кулькова И.В., Yvind K., Крыжановская Н.В., Максимов М.В., Жуков А.Е. Высокая характеристическая температура лазера на квантовых точках InAs/GaAs/InGaAsP с длиной волны излучения около 1.5 мкм, синтезированного на подложке InP // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 10. С. 1382–1386. <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.10.45017.8590>
 20. Dashkov A.S., Kostromin N.A., Babichev A.V., Goray L.I., Egorov A.Yu. Simulation of the energy-band structure of superlattice of quaternary alloys of diluted nitrides // Semiconductors. 2023. V. 57. N 3. P. 203–210. <https://doi.org/10.21883/sc.2023.03.56237.4163>
 - and Spectroscopy, 2019, vol. 127, no. 6, pp. 1053–1056. <https://doi.org/10.1134/s0030400x19120099>
 18. Blokhin S.A., Babichev A.V., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Blokhin A.A., Bobrov M.A., Maleev N.A., Kuzmenkov A.G., Nadtochiy A.M., Nevedomskiy V.N., Andryushkin V.V., Rochas S.S., Denisov D.V., Voropaev K.O., Zhumaeva I.O., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Investigation of the characteristics of the InGaAs/InAlGaAs superlattice for 1300 nm range vertical-cavity surface-emitting lasers. *Technical Physics*, 2022, vol. 67, no. 15, pp. 2432–2440. <https://doi.org/https://doi.org/10.21883/tp.2022.15.55271.240-21>
 19. Zubov F.I., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Zhukov A.E., Semenova E.S., Kulkova I.V., Yvind K. On the high characteristic temperature of an InAs/GaAs/InGaAsP QD laser with an emission wavelength of ~1.5 μm on an InP substrate. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 10, pp. 1332–1336. <https://doi.org/10.1134/s1063782617100207>
 20. Dashkov A.S., Kostromin N.A., Babichev A.V., Goray L.I., Egorov A.Yu. Simulation of the energy-band structure of superlattice of quaternary alloys of diluted nitrides. *Semiconductors*, 2023, vol. 57, no. 3, pp. 203–210. <https://doi.org/10.21883/sc.2023.03.56237.4163>

Авторы

Копытов Павел Евгеньевич — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57427541000](https://orcid.org/0009-0008-8345-461X), <https://orcid.org/0009-0008-8345-461X>, kopytovpe@itmo.ru

Андриюшкин Владислав Васильевич — кандидат технических наук, 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

Пирогов Евгений Викторович — научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 24468711600](https://orcid.org/0000-0001-7186-3768), <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>, pirogov_evgenii@spbau.ru

Соболев Максим Сергеевич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 57205203666](https://orcid.org/0000-0001-8629-2064), <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>, sobolevms@gmail.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>, a.babichev@itmo.ru

Шерняков Юрий Михайлович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 7005153098](https://orcid.org/0000-0001-5574-171X), <https://orcid.org/0000-0001-5574-171X>, Yuri.Shernyakov@mail.ioffe.ru

Максимов Михаил Викторович — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 7004999626](https://orcid.org/0000-0002-9251-226X), <https://orcid.org/0000-0002-9251-226X>, maximov@beam.ioffe.ru

Лютецкий Андрей Владимирович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 6506787947](https://orcid.org/0009-0007-6516-0936), <https://orcid.org/0009-0007-6516-0936>, lutetskiy@mail.ioffe.ru

Пихтин Никита Александрович — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 7004717756](https://orcid.org/0000-0002-0492-2227), <https://orcid.org/0000-0002-0492-2227>, nike@hpld.ioffe.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>, lkarachinsky@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

Authors

Pavel E. Kopytov — Engineer-Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57427541000](https://orcid.org/0009-0008-8345-461X), <https://orcid.org/0009-0008-8345-461X>, kopytovpe@itmo.ru

Vladislav V. Andryushkin — PhD, 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

Evgeniy V. Pirogov — Scientific Researcher, Alferov Academic University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 24468711600](https://orcid.org/0000-0001-7186-3768), <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>, pirogov_evgenii@spbau.ru

Maxim S. Sobolev — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, Alferov Academic University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 57205203666](https://orcid.org/0000-0001-8629-2064), <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>, sobolevms@gmail.com

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

Yuri M. Shernyakov — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 7005153098](https://orcid.org/0000-0001-5574-171X), <https://orcid.org/0000-0001-5574-171X>, Yuri.Shernyakov@mail.ioffe.ru

Mikhail V. Maximov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 7004999626](https://orcid.org/0000-0002-9251-226X), <https://orcid.org/0000-0002-9251-226X>, maximov@beam.ioffe.ru

Andrey V. Lyutetskiy — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 6506787947](https://orcid.org/0009-0007-6516-0936), <https://orcid.org/0009-0007-6516-0936>, lutetskiy@mail.ioffe.ru

Nikita A. Pikhtin — PhD, Head of Laboratory, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 7004717756](https://orcid.org/0000-0002-0492-2227), <https://orcid.org/0000-0002-0492-2227>, nike@hpld.ioffe.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>, lkarachinsky@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

Тянь Си-Конг — PhD, директор по производству, Китайско-германский центр зеленой фотоники им. Бимберга, Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики, Китайская академия наук, Чанчунь, 130033, Китай, [sc 56978639900](https://orcid.org/0009-0001-3610-5993), [https://orcid.org/0009-0001-3610-5993](mailto:tiansicong@ciomp.ac.cn), tiansicong@ciomp.ac.cn

Егоров Антон Юрьевич — доктор физико-математических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7202362169](https://orcid.org/0000-0002-0789-4241), <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>, aiegorov@itmo.ru

Sicong Tian — PhD, Head of Laser Fabrication, Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics, Changchun, 130033, China, [sc 56978639900](https://orcid.org/0009-0001-3610-5993), <https://orcid.org/0009-0001-3610-5993>, tiansicong@ciomp.ac.cn

Anton Yu. Egorov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7202362169](https://orcid.org/0000-0002-0789-4241), <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>, aiegorov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 23.06.2024
Одобрена после рецензирования 02.08.2024
Принята к печати 16.09.2024

Received 23.06.2024
Approved after reviewing 02.08.2024
Accepted 16.09.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»