

07

Источники мощных лазерных импульсов на длину волны 1550 nm на основе конструкций тиристорный ключ—лазер

© А.А. Подоскин¹, С.О. Слипченко¹, И.В. Шушканов¹, В.А. Крючков¹, П.С. Гаврина¹, М.И. Кондратов¹, А.Е. Гришин¹, Н.А. Пихтин¹, Т.А. Багаев^{1,2}, В.Н. Светогоров², М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

E-mail: Podoskin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 29 мая 2025 г.

Принято к публикации 2 июня 2025 г.

Разработаны и исследованы компактные источники мощных лазерных импульсов с длиной волны 1550–1600 nm для лидарных применений, выполненные на основе сборки лазерный диод—тиристорный ключ. Продемонстрирована пиковая мощность лазерных импульсов 73 W при рабочем напряжении 50 V. Измеренная амплитуда импульсов тока в контуре компактной сборки составила 300 A при рабочем напряжении 30 V.

Ключевые слова: импульсный полупроводниковый лазер, тиристор, токовый ключ.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.16.60929.20347

Компактные источники мощных лазерных импульсов, работающие в спектральном диапазоне 1300–1600 nm, востребованы для задач, предусматривающих распространение излучения в свободном пространстве, что связано с безопасностью для глаз [1]. При этом задача повышения пиковой оптической мощности подобных источников актуальна для создания дальномеров и автомобильных лидаров, так как обеспечивает увеличение дальности и защиту от внешних помех [2–4]. Кроме того, важным требованием является обеспечение компактности, так как системы построения трехмерных картин окружающего пространства могут использовать до нескольких десятков таких источников [5]. Ранее были продемонстрированы импульсные источники с мощностью излучения до нескольких киловатт для спектрального диапазона 900–910 nm, использующие внешний генератор импульсов тока накачки [6,7]. В этом случае токовые ключи на основе полевых транзисторов, драйверы управления и другие элементы схемы располагались на отдельной плате в непосредственной близости от лазерных кристаллов и занимали заметно больший размер по сравнению с лазерными кристаллами. В работах [8,9] показано, что задача снижения габаритов импульсных источников может быть решена с помощью конструкции тиристорный ключ—лазерный диод. В работе [10] для такой конструкции излучателя была продемонстрирована мощность 20 W на длине волны 1475 nm, но ширина апертуры излучателя была ограничена 200 μm . В приведенных случаях достигаемые пиковые токи не превышали 100 A, что недостаточно для создания импульсных источников с высокой пиковой мощностью. Также существует подход к созданию импульсных излучателей на основе эпитаксиально-интегрированных

лазерных и тиристорных гетероструктур [11,12], однако этот подход реализован в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs и не позволяет получать длины волн генерации 1550–1600 nm. В работе представлены новые результаты, связанные с разработкой компактных источников мощных лазерных импульсов, работающих на длинах волн ~ 1600 nm, соответствующих безопасному для глаз спектральному диапазону.

Экспериментальные образцы разработанных компактных импульсных источников были построены на основе вертикальных сборок лазерный диод—тиристорный ключ. Схематическое изображение используемой конструкции показано на рис. 1. Как было продемонстрировано ранее, эффективное включение тиристорного ключа обеспечивается малосигнальным током управления с амплитудой на уровне десятков миллиампер, при этом нет высоких требований к форме и фронту импульса управления. Именно поэтому предлагаемые конструкции не требуют применения сложных схем управления, что позволяет избавиться от многих компонентов, характерных для электрических схем на основе транзисторов, и таким образом обеспечить компактность источника. Также важный фактор, обеспечивающий компактность, связан с возможностью вертикальной интеграции тиристорного ключа и лазерного кристалла полосковой конструкции, что обеспечивает снижение внешних паразитных связей, снижающих быстродействие и эффективность. Кристаллы лазерных диодов были созданы на основе полупроводниковой гетероструктуры, выращенной методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии). В работе использована одна из типичных конструкций гетероструктуры для мощных полосковых AlInGaAs/InP-

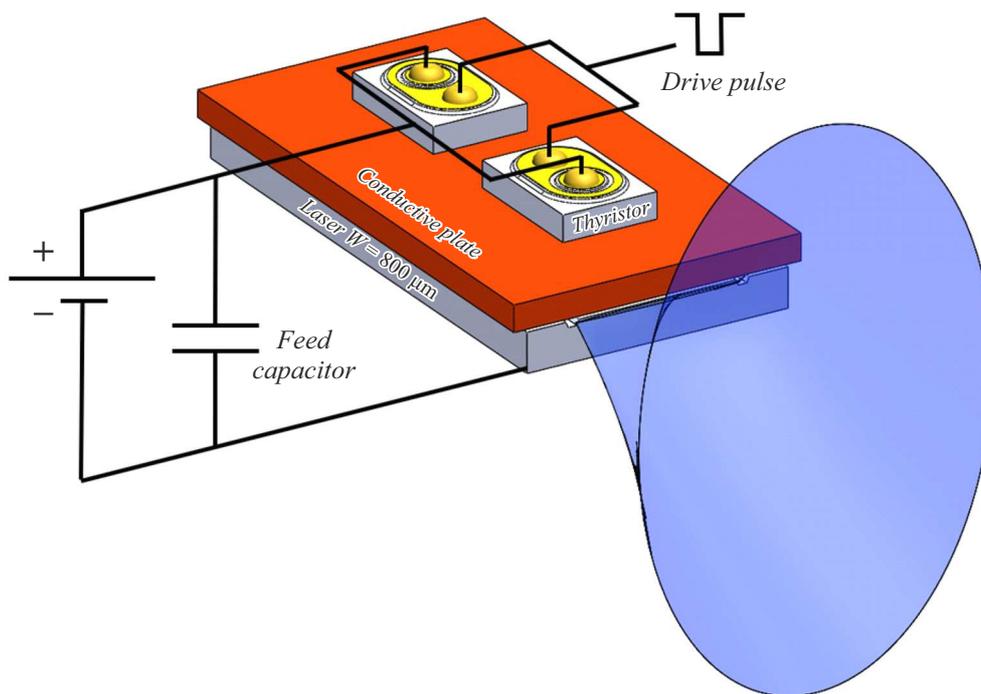


Рис. 1. Конструкция компактных импульсных источников на основе вертикальных сборок лазерный диод–тиристорный ключ при различных рабочих напряжениях.

лазеров с длиной волны генерации 1400–1500 nm. Гетероструктура включала в себя сверхузкий волноводный слой AlInGaAs толщиной 130 nm, в центре которого располагалась активная область на основе двух квантовых ям, обеспечивающих излучение на длине волны 1580 nm. Волноводный слой был окружен широкозонными барьерами AlInAs. Использование данных барьеров вызвано необходимостью подавления утечек носителей заряда из волноводного слоя, так как гетерограница AlInGaAs/InP сформирована гетеропереходом второго рода и не позволяет сформировать энергетический барьер для носителей заряда при переходе от узкозонного волновода AlInGaAs к широкозонным эмиттерам на основе InP [13]. На основе разработанной гетероструктуры были изготовлены лазерные кристаллы со сверхширокой конструкцией излучающей апертуры (800 μm) и длиной резонатора Фабри–Перо 2 mm с нанесенными отражающим (95%) и просветляющим (4%) покрытиями. Ранее было показано, что использование подобной конструкции монолитной излучающей апертуры обеспечивает максимальный фактор заполнения и позволяет сохранить линейность ватт-амперной характеристики при высоких токах накачки за счет снижения плотности тока [6]. В рамках настоящей работы основное внимание уделялось возможности повышения пиковой мощности, поэтому в конструкции импульсного источника использовался внешний конденсатор номиналом 900 nF, обеспечивающий требуемый уровень запасенной энергии для генерации импульсов тока амплитудой, существенно превышающей уровень 100 A. Размер использованных

тиристорных чипов составлял 500 × 340 μm при диаметре анодного контакта 150 μm. С учетом ширины апертуры излучателя 800 μm и длины резонатора лазера 2 mm для обеспечения более однородной прокачки лазерного кристалла в излучающей сборке использовалось два чипа тиристорных токовых ключей (рис. 1).

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе исследовались лазерные импульсы, генерируемые компактными сборками лазерный диод–тиристорный ключ. Однако в данном случае достаточно сложно оценить амплитуду импульсов тока, возбуждаемых в контуре, поскольку токовый контур принципиально не содержал никаких дополнительных элементов, которые могли бы ограничивать достигаемую амплитуду тока, а содержал только вертикальную излучающую сборку и питающий конденсатор. Поэтому на втором этапе с целью оценки амплитуды импульсов тока проводились измерения отдельно лазерных кристаллов со сверхширокой (800 μm) излучающей апертурой при накачке внешним генератором импульсов тока, позволявшим провести прямое измерение пикового тока за счет использования контрольных резисторов. Типичные формы лазерных импульсов, излучаемых сборками лазерный диод–тиристорный ключ при различных рабочих напряжениях, показаны на рис. 2, а. При рабочем напряжении 50 V была достигнута пиковая оптическая мощность 73 W, что является наибольшим из известных нам значений, продемонстрированных для излучателей с монолитной излучающей апертурой. При этом значение мощности, приведенной к единице длины апертуры,

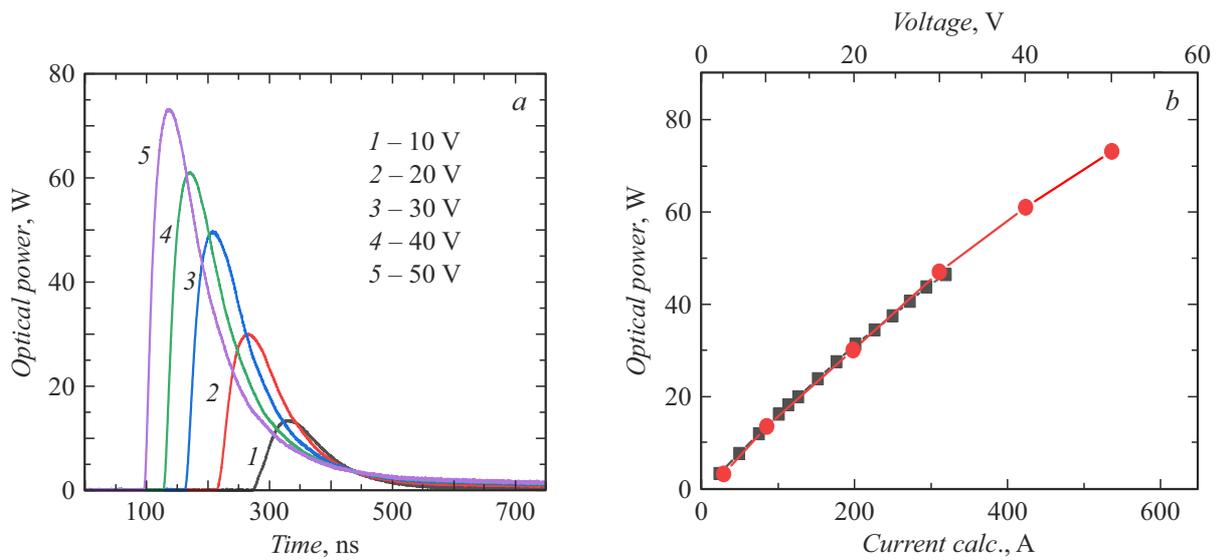


Рис. 2. *a* — динамика выходной оптической мощности для компактных импульсных источников на основе вертикальных сборок лазерный диод—тиристорный ключ. *b* — зависимости пиковой мощности лазерных импульсов от амплитуды тока накачки для отдельного кристалла лазерного диода с шириной излучающей апертуры $800\ \mu\text{m}$ при накачке внешним источником импульсов тока накачки (квадраты) и пиковой мощности от рабочего напряжения для компактного импульсного источника на основе вертикальной сборки лазерный диод—тиристорный ключ (кружки).

сопоставимо с результатами при накачке мощных полупроводниковых лазеров на $1550\text{--}1600\ \text{nm}$ внешним источником импульсной накачки [14–16]. Эффективность разработанного источника определяется эффективностью лазера и токового ключа. Эффективность токового ключа связана с остаточным напряжением в открытом состоянии. Для исследуемых ключей остаточное напряжение достигало $1.5\ \text{V}$, что существенно ниже значений, получаемых для ключей на основе лавинных транзисторов, где остаточное напряжение достигает $50\ \text{V}$ [17]. Включение тиристорного ключа обеспечивалось импульсом тока управления амплитудой $100\ \text{mA}$. Передний фронт включения на уровне $10\text{--}90\%$ составил $10\ \text{ns}$ при общей длительности лазерных импульсов на уровне половины от максимума $95\ \text{ns}$. Из рис. 2, *a* видно, что общая длительность лазерных импульсов и длительность переднего фронта сохраняются с ростом амплитуды лазерных импульсов, что свидетельствует о сохранении динамических характеристик тиристорного токового ключа в исследуемом диапазоне напряжений. Результаты исследований распределения интенсивности излучения по излучающей апертуре и диаграмма направленности излучения показаны на рис. 3, *a* и *b* соответственно. Распределение интенсивности излучения по излучающей апертуре имело достаточно однородный характер во всем диапазоне напряжений питания. Данный факт демонстрирует, что, несмотря на высокие амплитуды импульсного тока и сверхширокую излучающую апертуру, использованная конструкция вертикальной сборки обеспечивает достаточно однородную накачку по всей площади лазерного излучателя. Диаграмма направленности так же демонстрировала стабильность модовой структу-

ры лазерного излучателя вплоть до максимальных токов накачки. Расходимость излучения в плоскости слоев гетероструктуры составляла 9° во всем диапазоне напряжений питания, что также подтверждает стабильность модовой структуры излучателя. Расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной слоям гетероструктуры, составляла 23° и соответствовала фундаментальной поперечной оптической моде. На рис. 3, *c* представлены спектры лазерной генерации. Центральная длина волны находилась в диапазоне $1590\text{--}1600\ \text{nm}$. Видно, что с ростом пиковой мощности ширина спектра увеличивается от 11 до $18\ \text{nm}$ на полувысоте, при этом наблюдается заметное смещение в длинноволновую область. Такое поведение может быть вызвано как тепловым разогревом [18], так и эффектами, связанными с неоднородным распределением усиления вдоль оси резонатора [19], и анализ причин требует дополнительных исследований.

Для оценки амплитуды импульсов тока накачки, достигаемых в компактных сборках лазерный диод—тиристорный ключ, были проведены исследования ватт-амперных характеристик лазерных диодов, идентичных использованным в компактных сборках, при накачке внешним источником импульсов тока на основе коммерческих полевых транзисторов (длительность импульса $130\ \text{ns}$ на уровне половины амплитуды), обеспечивающим генерацию импульсов тока амплитудой до $300\ \text{A}$. В используемом внешнем источнике амплитуда тока измерялась с помощью контрольного сопротивления. На рис. 2, *b* приведены отдельно зависимость выходной оптической мощности от тока накачки для лазерного диода с внешней накачкой, а также зависимость пиковой мощности от рабочего напряжения для компактной вер-

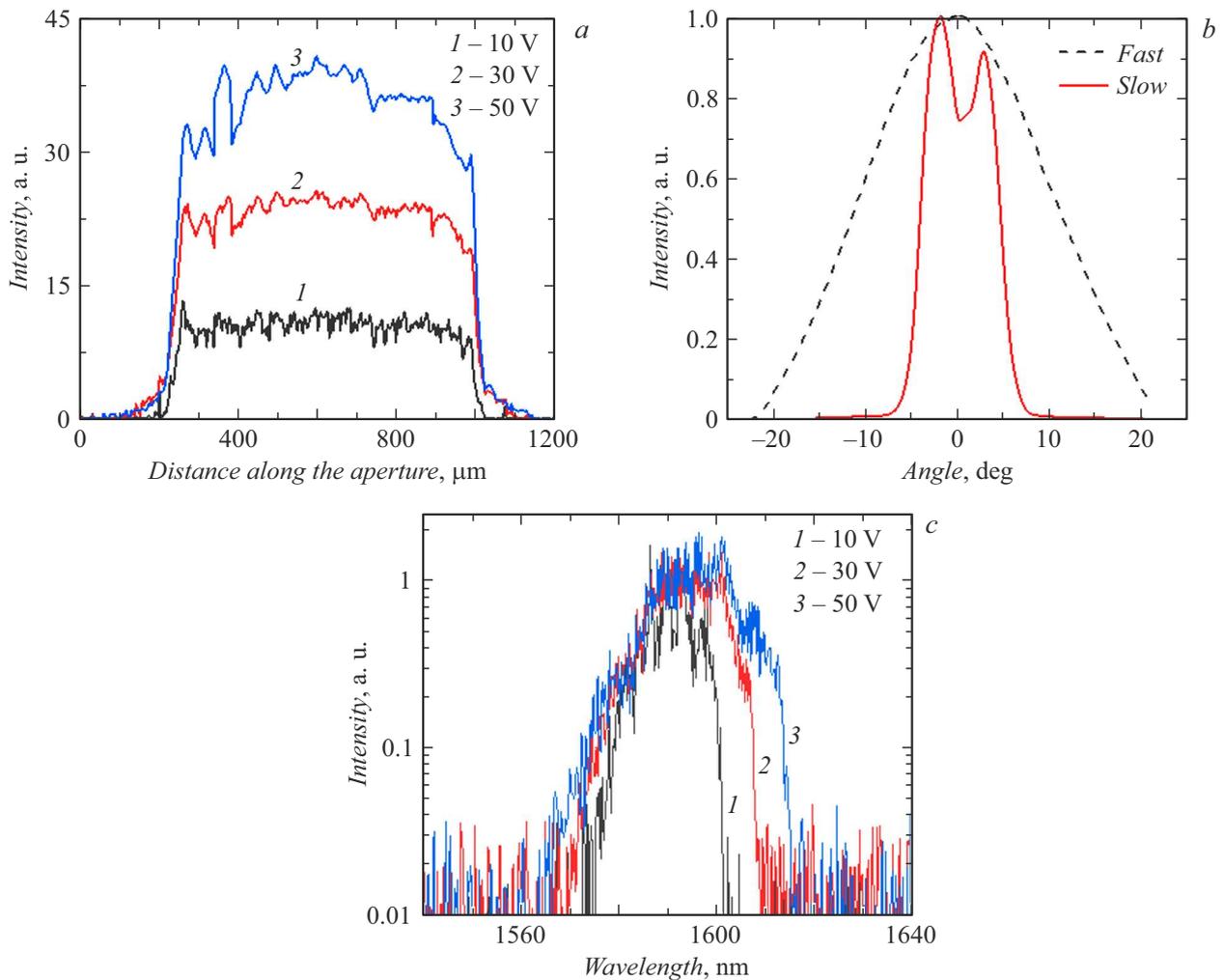


Рис. 3. Распределения интенсивности излучения в ближней (а) и дальней (b) зонах, а также оптические спектры (с) для компактных импульсных источников на основе вертикальных сборок лазерный диод–тиристорный ключ, полученные при различных рабочих напряжениях.

тикальной сборки лазерный диод–тиристорный ключ. Для удобства анализа начальные линейные участки полученных зависимостей выходной оптической мощности были совмещены, что позволяет сделать косвенную оценку амплитуды тока, генерируемого в контуре компактной сборки. Видно хорошее совпадение ватт-амперной (токи до 300 А) и ватт-вольтной (напряжения до 30 В) характеристик, при этом характер зависимостей близок к линейному. Приведенное сравнение демонстрирует генерацию импульсов тока амплитудой 300 А в контуре компактной вертикальной сборки лазерный диод–тиристорный ключ при рабочем напряжении 30 В. Для более высоких рабочих напряжений наблюдается отклонение зависимости „выходная пиковая мощность–рабочее напряжение“ от линейной формы (рис. 2, b). Это может быть связано как с особенностями работы лазерного излучателя, так и с особенностями работы контура тока разработанной сборки, что требует проведения дополнительных исследований.

В результате проведенной работы были продемонстрированы компактные импульсные источники с длиной волны 1550–1600 нм на основе вертикальных сборок лазерный диод–тиристорный ключ. Использование конструкций лазерного кристалла со сверхширокой апертурой (800 μm) позволило сохранить высокую излучательную эффективность и продемонстрировать пиковую мощность 73 Вт при длительности импульса 95 нс. Продemonстрированный набор габаритных и мощностных характеристик в сочетании с требованиями по безопасности для зрения делает разработанные источники перспективными для лидарных применений. Сделанные оценки достигнутой амплитуды импульса тока накачки в 300 А при рабочем напряжении 30 В также демонстрируют потенциал для дальнейшего повышения выходной оптической мощности за счет применения многоэлементных излучателей как на основе гибридных вертикальных стеков из нескольких отдельных чипов,

так и на базе эпитаксиально-интегрированных многопереходных гетероструктур и излучателей на их основе.

Финансирование работы

Разработка, изготовление и исследования экспериментальных образцов выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 22-79-10159. Разработка постростовых операций выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.A. Curcio, C.C. Petty, *J. Opt. Soc. Am.*, **41** (5), 302 (1951). DOI: 10.1364/JOSA.41.000302
- [2] S. Royo, M. Ballesta-Garcia, *Appl. Sci.*, **9** (19), 4093 (2019). DOI: 10.3390/APP9194093
- [3] Y. Zhang, A. Carballo, H. Yang, K. Takeda, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **196** (11), 146 (2023). DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.021
- [4] J. Rapp, J. Tachella, Y. Altmann, S. McLaughlin, V.K. Goyal, *IEEE Signal Proc. Mag.*, **37** (4), 62 (2020). DOI: 10.1109/MSP.2020.2983772
- [5] <https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor>
- [6] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, N.A. Pikhtin, P.S. Kop'ev, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **33** (1), 7 (2021). DOI: 10.1109/LPT.2020.3040063
- [7] N. Ammouri, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maassdorf, H. Wenzel, A. Knigge, *Electron. Lett.*, **59** (1), 1 (2022). DOI: 10.22541/au.166520352.25121396/v1
- [8] S. Slipchenko, A. Podoskin, I. Shushkanov, A. Rizaev, M. Kondratov, V. Shamakhov, V. Kapitonov, K. Bakhvalov, A. Grishin, T. Bagaev, M. Ladugin, A. Marmalyuk, V. Simakov, N. Pikhtin, *Photonics*, **12**, 130 (2025). DOI: 10.3390/PHOTONICS12020130
- [9] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, M.G. Rastegaeva, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, *Chin. Opt. Lett.*, **22** (7), 072501 (2024). DOI: 10.3788/COL202422.072501
- [10] A.A. Подоскин, И.В. Шушканов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, Ю.Л. Рябоштан, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков, *ФТП*, **58** (3), 165 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58409.6405 [A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, V.N. Svetogorov, Yu.L. Ryaboshtan, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, *Semiconductors*, **58** (3), 159 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2025.16.60929.20347].
- [11] T. Kondo, J. Hayakawa, D. Iguchi, T. Sakita, T. Higuchi, K. Takeyama, S. Ohno, M. Murata, H. Usami, *Photonics*, **10** (3), 304 (2023). DOI: 10.3390/photonics10030304
- [12] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, A.V. Rozhkov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, V.A. Simakov, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **27** (3), 307 (2014). DOI: 10.1063/1.4893956
- [13] D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, I.K. Kirichenko, A.A. Podoskin, N.V. Shuvalova, N.A. Rudova, L.S. Vavilova, M.G. Rastegaeva, T.A. Bagaev, V. Svetogorov, A. Padalitsa, Yu.L. Ryaboshtan, M.A. Ladugin, A. Marmalyuk, *J. Lumin.*, **263** (197), 120164 (2023). DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.120164
- [14] Н.А. Волков, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, Ю.Л. Рябоштан, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, *Квантовая электроника*, **51** (2), 133 (2021). [N.A. Volkov, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, Yu.L. Ryaboshtan, V.N. Svetogorov, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, *Quantum Electron.*, **51** (2), 133 (2021). DOI: 10.1070/QEL17480].
- [15] L.W. Hallman, B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin, J.T. Kostamovaara, *Electron. Lett.*, **57** (23), 891 (2021). DOI: 10.1049/ell2.12298
- [16] T.M. Diallo, C. Rodriguez, E. Desfonds, J.-F. Boucher, M.-S. Rouifed, *SPIE*, **13345**, 168 (2025). DOI: 10.1117/12.3041973
- [17] S. Vainshtein, V. Zemlyakov, V. Egorkin, A. Maslevtsov, A. Filimonov, *IEEE Trans. Power Electron.*, **34** (4), 3689 (2018). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853563
- [18] I.S. Shashkin, A.D. Rybkin, V.A. Kryuchkov, A.E. Kazakova, D.N. Romanovich, N.A. Rudova, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50**, S18 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623130122
- [19] С.О. Слипченко, В.С. Головин, О.С. Соболева, И.А. Ламкин, Н.А. Пихтин, *Квантовая электроника*, **52** (4), 343 (2022). [S.O. Slipchenko, V.S. Golovin, O.S. Soboleva, I.A. Lamkin, N.A. Pikhtin, *Quantum Electron.*, **52** (4), 343 (2022). DOI: 10.1070/QEL18015].