

07

Активные элементы нейроморфных фотонных схем на основе лазеров на квантовых точках, изготовленные методом травления сфокусированным ионным пучком

© А.С. Паюсов^{1,2}, Ф.И. Зубов¹, А.А. Бекман², Г.О. Корнышов², Н.Ю. Гордеев²,
Н.А. Калюжный², В.П. Евтихийев², Г.В. Вознюк², М.И. Митрофанов^{2,3},
Ю.М. Шерняков², М.В. Максимов¹

¹ Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: plusov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 2 июня 2026 г.

Принято к публикации 3 июня 2026 г.

Разработана технология изготовления зеркал полупроводниковых лазеров с вертикальными стенками с малой шероховатостью поверхности, основанная на травлении сфокусированным ионным пучком. Технология использована для изготовления прототипов элементов монолитных нейроморфных фотонных схем, представляющих собой два оптически связанных и электрически изолированных торцевых лазера на квантовых точках InAs/InGaAs/GaAs. Длинный лазер, работающий на основном состоянии квантовых точек, играет роль тормозного оптического нейрона, а короткий лазер, работающий на возбужденном состоянии квантовых точек, — возбуждающего оптического нейрона. Подавление генерации короткого лазера за счет оптической накачки длинным лазером имитирует реакцию возбуждающего оптического нейрона на тормозной импульс.

Ключевые слова: нейроморфная система, фотонная схема, сфокусированный ионный пучок, полупроводниковый лазер, квантовые точки.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.17.63481.20727

Разработка и исследование нейроморфных оптических фотонных схем являются перспективным направлением развития современной оптоэлектроники. В различных полупроводниковых светоизлучающих устройствах, таких как односекционные [1] и двухсекционные [2] торцевые лазеры, микрокольца и микродиски [3,4], вертикальные лазеры [5], под действием электрической или оптической накачки может происходить резкий рост интенсивности излучения, который можно интерпретировать как сигнал нервной возбудимости, а сами приборы рассматривать как оптические нейроны. Однако большинство существующих приборов не может в настоящее время полностью имитировать как возбуждающие, так и тормозные нейроны, поскольку они испускают только сигналы возбуждения и не способны имитировать тормозной режим работы. В нашей предыдущей работе [6] было предложено имитировать поведение возбуждающих и тормозных биологических нейронов за счет эффектов переключения длины волны генерации в торцевых лазерах на InAs/InGaAs/GaAs квантовых точках (КТ), активируемых дополнительной оптической накачкой. Два торцевых лазера монтировались встык с зазором между зеркалами в несколько микрометров, что позволяло вводить излучение в исследуемый лазер непосредственно из торца другого лазера. Эта оптическая схема в отличие от [7,8] не использует внешние перестраиваемые лазеры, оптиче-

ские изоляторы и фильтры и поэтому представляется перспективной для применения в интегральной фотонике ввиду своей компактности и относительной простоты. Лазер, работающий в режиме генерации через основное состояние (ground state, GS) КТ, играл роль тормозного оптического нейрона, а лазер в режиме генерации через возбужденное состояние (excited state, ES) — возбуждающего нейрона. Импульсы на длине волны основного состояния КТ (1260 nm) интерпретировались как сигналы нервного торможения, а импульсы на длине волны возбужденного состояния (1180 nm) — как сигналы нервного возбуждения. Однако с точки зрения масштабирования предложенного подхода и его применения в интегральной оптоэлектронике гибридная интеграция большого количества лазеров является чрезвычайно сложной и экономически неэффективной задачей. Необходимы оптические схемы, которые могут быть созданы с применением современных планарных технологий.

В настоящей работе мы исследуем оптическую схему, состоящую из двух монолитно интегрированных торцевых лазеров, зеркала которых изготовлены методом травления сфокусированным ионным пучком (СИП) (focused ion beam, FIB). Ранее мы уже продемонстрировали возможность применения данной технологии для модификации выходного зеркала лазера [9]. Преимуществом метода травления сфокусированным

ионным пучком является возможность создавать глубокие канавки без предварительного нанесения маски и тем самым изготавливать на основе существующих чипов с электрическими контактами пары оптически связанных лазеров с требуемыми размерами. Данный метод существенно ускоряет процесс исследований и оптимизации конструкции интегральных оптических схем. В дальнейшем разработанные оптические схемы могут быть изготовлены при помощи совместимых с массовым производством стандартных постростовых процессов (оптической литографии и сухого травления).

Лазерная гетероструктура была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs(100). Сначала выращивался буферный слой GaAs n -типа толщиной $0.5 \mu\text{m}$, затем нижний эмиттер $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ n -типа толщиной $2.5 \mu\text{m}$, волновод GaAs толщиной $440 \mu\text{m}$ с активной областью, верхний эмиттер $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ p -типа толщиной $2.2 \mu\text{m}$ и контактный слой p^+ -GaAs толщиной $0.2 \mu\text{m}$. Активная область представляла собой десять слоев КТ InAs/InGaAs/GaAs, разделенных спейсерами GaAs толщиной 35 nm и расположенных симметрично относительно центра волновода. КТ InAs/InGaAs/GaAs формировались в процессе зарощивания начальных трехмерных островков, осажженных в режиме Странского–Крастанова (0.8 nm InAs), слоем $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной 5 nm .

Из эпитаксиальной гетероструктуры методами оптической литографии и сухого травления были изготовлены торцевые лазеры с шириной полоска $50 \mu\text{m}$, которые затем разделялись методом раскалывания на отдельные чипы разной длины. Базовые характеристики чипов до и после изготовления зеркал исследовались при импульсной накачке. Излучение собиралось линзами и детектировалось при помощи монохроматора, синхронного детектора и Ge-фотодиода. В процессе всех измерений температура теплоотводов стабилизировалась и составляла 20°C .

Для изготовления зеркал методом травления СИП галлия использовалась оригинальная сверхвысоковакуумная установка прямой нанолитографии, основанная на растровой ионной и электронной колонне производства Orsay Physics. На ней проводились технологические операции и исследование геометрических характеристик полученных профилей травления с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и ионной микроскопии. Топография поверхности литографического рисунка, сформированного СИП, исследовалась на сканирующем зондовом атомно-силовом микроскопе производства NT-MDT. Для предотвращения сегрегации капель элементов третьей группы в процессе травления гетероструктуры использовался газ-прекурсор XeF_2 . Были разработаны оптимальные технологические режимы для формирования зеркал, обеспечивающие вертикальность

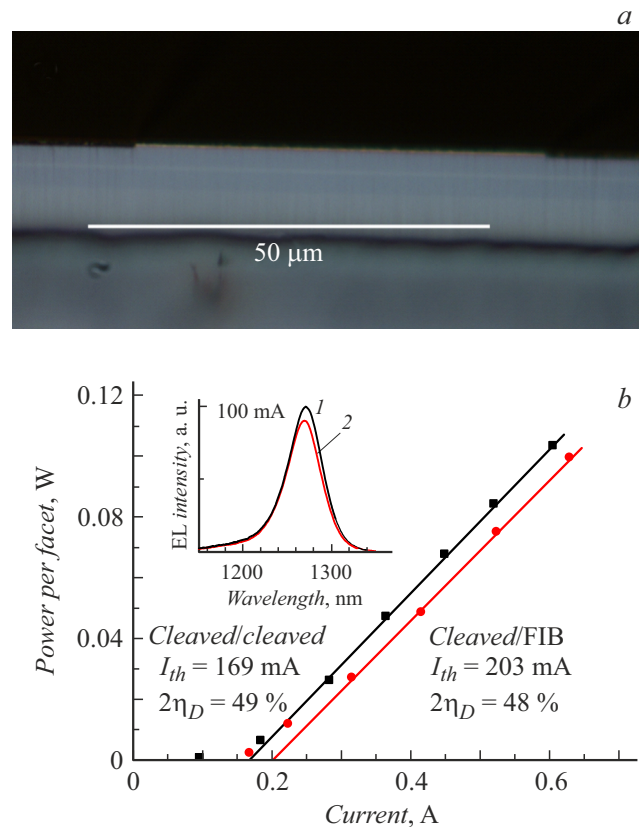


Рис. 1. *a* — оптическая микрофотография зеркала, сформированного с помощью СИП; *b* — ватт-амперные характеристики лазеров до (cleaved/cleaved) (квадраты) и после (cleaved/FIB) (кружки) травления переднего зеркала. На вставке — спектры спонтанного излучения лазеров при 100 mA до (1) и после (2) травления переднего зеркала.

зеркала и малую шероховатость его поверхности (рис. 1, *a*).

Для исследования качества зеркал, полученных с помощью СИП, использовались торцевые лазеры длиной $750 \mu\text{m}$, в которых генерация осуществлялась через основное состояние КТ. Первоначально измерялись ватт-амперные характеристики, спектры и дальние поля лазеров с двумя сколотыми гранями. Затем одно из зеркал полностью стравливалось с помощью СИП, т.е. вместо сколотой грани методом СИП формировалось новое зеркало (рис. 1, *a*).

Так как при разделении лазера на две секции требуется удалить большой объем материала (рис. 2), для ускорения процесса необходимо использовать относительно большой рабочий ток ионного пучка. Однако травление в таком режиме создает шероховатую поверхность. Поэтому был использован подход, при котором основной объем лазерной структуры при формировании канавки, разделяющей лазерные секции, удалялся ионным пучком с большим рабочим током, а затем ионным пучком с меньшим рабочим током производилось окончательное формирование поверхности зеркал в области полоска.

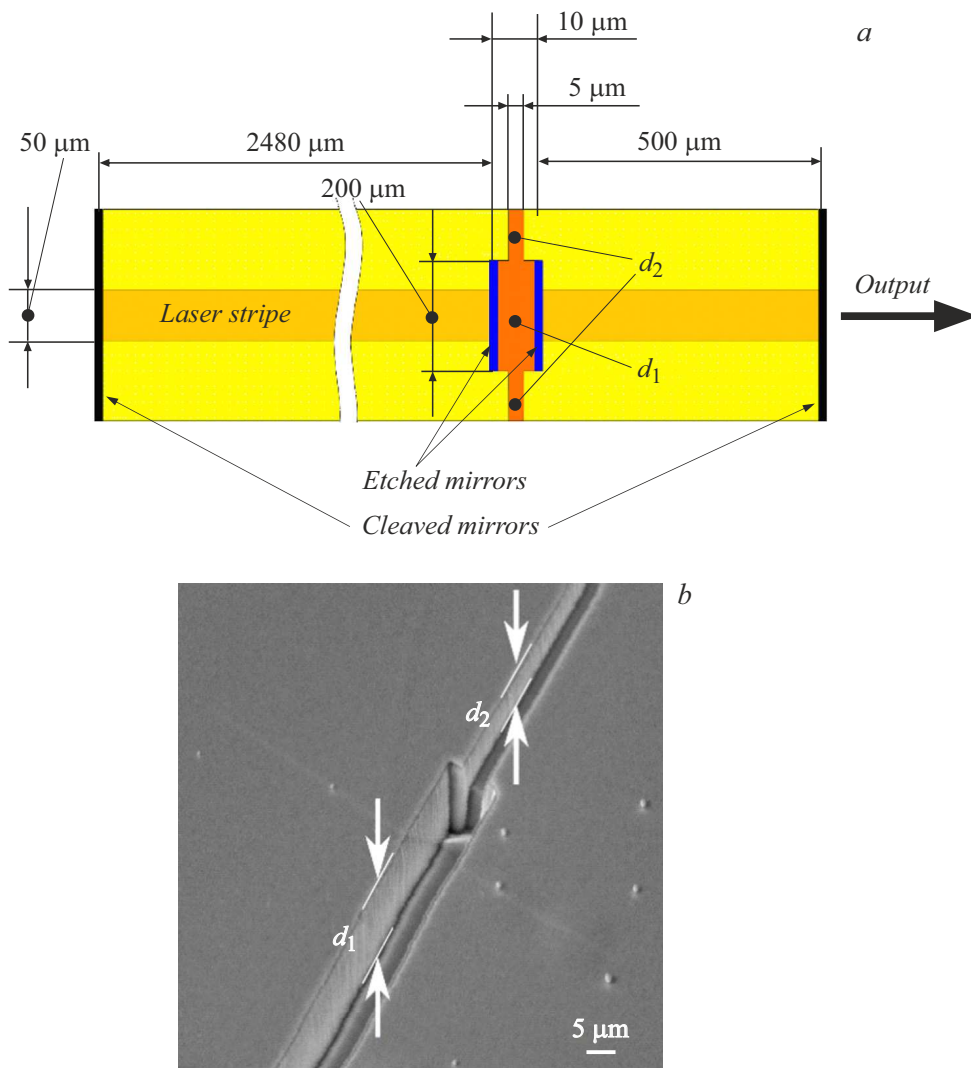


Рис. 2. *a* — схематичное изображение интегральной оптической схемы из двух лазерных диодов, полученной с помощью травления СИП; *b* — СЭМ-изображение канавки, разделяющей лазеры. d_1 и d_2 — глубины травления в соответствующих областях.

Параметры травления и шероховатость зеркал, сформированных СИП (энергия ионов 30 keV)

Номер лазера	Рабочий ток, нА	Шаг пучка, нм	Экспозиция, μ s	Ионная доза, 10^{18} cm^{-2}	$R_a (R_{\text{max}})$, нм
1	5	40	1	3	16.8 (145)
2	10	150	1	3	5.2 (60)
	2.5	40	5	3.4	
3	10	150	1	3	4.1 (51)
	1	40	10	3.1	

Для оценки качества поверхности зеркала лазерной полоски, сформированного предлагаемым методом, было проведено травление выходных зеркал трех полосковых лазеров (см. таблицу). Поверхность получившихся зеркал исследовалась на атомно-силовом микроскопе. Получены значения средней шероховатости R_a и полной

высоты профиля R_{max} . Так как шероховатости зеркал второго и третьего лазера различаются незначительно, для уменьшения времени формирования канавок, разделяющих лазерные секции, был выбран технологический режим с дотравливанием зеркала рабочим током ионного пучка 2.5 нА.

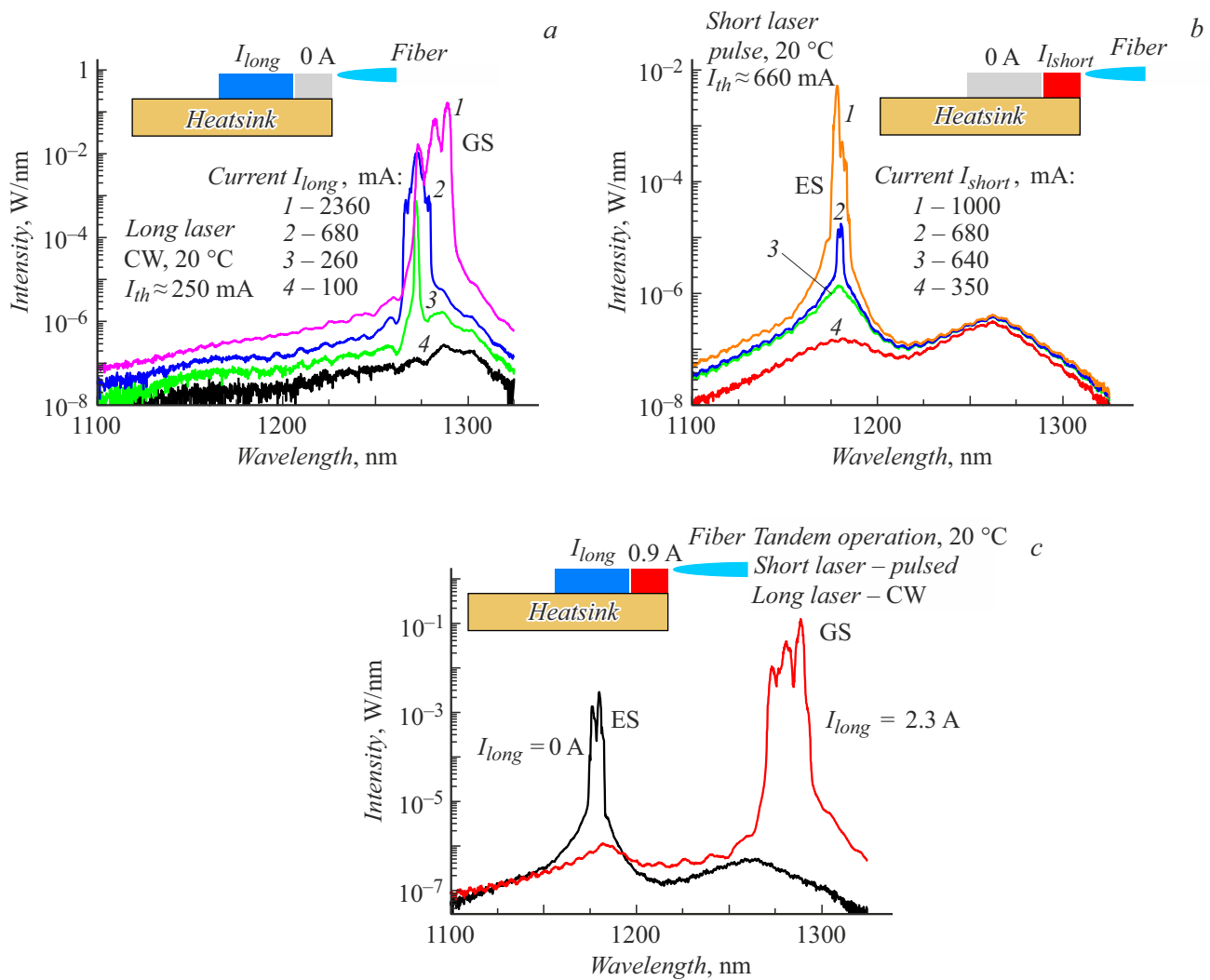


Рис. 3. Собственные спектры излучения длинного лазера (long laser) сквозь короткий лазер в непрерывном режиме (a) и короткого (short laser) в импульсном режиме (b), а также спектры излучения короткого лазера при его дополнительной оптической накачке длинным лазером (c). На вставках представлены схематические изображения конфигурации измерений. Лазеры в режимах GS- и ES-генерации показаны синим и красным цветом соответственно. Лазеры, через которые не пропускается ток, показаны серым. Над каждым лазером обозначен его ток накачки. I_{th} — пороговые токи соответствующих лазеров. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

После изготовления зеркал вновь измерялись все характеристики лазеров (рис. 1, b). Было обнаружено незначительное (в 1.2 раза) увеличение порогового тока и уменьшение дифференциальной эффективности на 1%. Данный результат, на наш взгляд, является следствием большей шероховатости травленного зеркала по сравнению с шероховатостью зеркала, полученного методом скалывания. При этом спектры спонтанного излучения и лазерной генерации, а также дальние поля излучения практически не изменились. Таким образом, можно сделать вывод, что травленные зеркала имеют высокое качество и практически не ухудшают характеристики лазеров.

Для проверки работоспособности нейроморфных оптических схем в интегральном исполнении, полученных

с помощью СИП, был выбран ключевой эксперимент по изучению влияния оптической инжекции на длине волны GS-перехода на лазер, работающий в режиме ES-генерации. Данный эксперимент имитировал реакцию возбуждающего нейрона на тормозной импульс, в результате которой происходит гашение возбуждающего импульса возбуждающего нейрона. С использованием оптимизированных процессов травления СИП лазерный диод, изготовленный на основе структуры с десятью слоями квантовых точек, длиной $2990 \mu\text{m}$ с шириной полоска $50 \mu\text{m}$ был разделен канавкой (рис. 2) на две секции (два независимых лазера) длиной $2480 \mu\text{m}$ (long laser) и $500 \mu\text{m}$ (short laser). Расположение канавки подбиралось так, чтобы длинный лазер обеспечивал устойчивую генерацию на основном состоянии КТ при

непрерывной накачке, а короткий — на возбужденном состоянии при импульсной. Канавка, расположенная перпендикулярно оси резонатора и пересекающая верхний контакт, имела длину $200\ \mu\text{m}$, ширину $10\ \mu\text{m}$ и глубину (d_1) не менее $6\ \mu\text{m}$, т.е. травление осуществлялось сквозь все эпитаксиальные слои вплоть до подложки. Для обеспечения электрической изоляции между секциями канавка простиралась от полоска до края чипа, но имела меньшую ширину $5\ \mu\text{m}$ и глубину (d_2) не менее $2.5\ \mu\text{m}$, т.е. травление осуществлялось только сквозь контактный и верхний эмиттерный слой.

Для оптической инжекции использовался лазер длиной $2480\ \mu\text{m}$, стабильно работающий в непрерывном режиме на длине волны GS-генерации с пороговым током $I_{th}^{GS} = 250\ \text{mA}$ (тормозной оптический сигнал). Более короткий лазер длиной $500\ \mu\text{m}$ (возбуждающий оптический нейрон) работал в импульсном режиме на длине волны ES-генерации с пороговым током $I_{th}^{ES} = 660\ \text{mA}$. Собственные спектры длинного и короткого лазеров — спектры одного лазера при выключенном другом — представлены на рис. 3, *a, b*. Излучение собиралось с помощью линзированного волокна (fiber) со стороны торца короткого лазера и регистрировалось спектроанализатором с волоконным входом Yokagawa AQ6370.

Оптическая накачка переднего лазера GS-излучением заднего лазера приводит к уменьшению интенсивности ES-излучения переднего лазера более чем на четыре порядка (рис. 3, *c*). Этот результат полностью аналогичен описанному ранее эффекту в длинном и коротком лазерах, состыкованных методом микромонтажа [6]. Однако при исследовании монолитно-интегрированных лазеров имелась некая специфика по сравнению с состыкованными парами лазеров. Поскольку пары лазеров, изготовленные с помощью СИП, напаяны *p*-контактом вверх (они имели общий *n*-контакт), при накачке постоянным током наблюдались перегрев и некоторое увеличение порогового тока. Таким образом, пороговые токи лазеров были несколько выше, чем у отдельных напаянных *p*-контактом вниз лазеров той же длины. Однако данное обстоятельство не повлияло на результаты эксперимента. Для улучшения отвода тепла возможен монтаж монолитно-интегрированных пар лазеров, изготовленных с помощью СИП, на специальные металлизированные платы с разрывом в контакте, которые позволяют осуществлять независимую инжекционную накачку каждого из лазеров.

Таким образом, показано, что травление сфокусированным ионным пучком позволяет формировать зеркала торцевых лазеров с нанесенным верхним контактом. Изготовленные таким способом зеркала обладают высоким качеством, близким к качеству зеркал, полученных скальвированием. Данный метод также позволяет разделять лазеры с верхним контактом на несколько оптически связанных и электрически независимых секций, причем

характеристики отдельных секций аналогичны характеристикам торцевых лазеров той же длины со сколотыми зеркалами. Для исследовательских целей метод травления сфокусированным ионным пучком является более удобным и гибким, чем формирование приборов с заданными геометрическими параметрами стандартными методами оптической литографии и плазмохимического травления, и дает широкие возможности для изготовления и оптимизации лабораторных образцов многосекционных оптоэлектронных приборов, таких как лазеры с пассивной секцией, оптические усилители, суперлюминесцентные диоды сложных конструкций с усилительной секцией, а также элементов фотонных интегральных схем.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00358. А.С. Паюсов благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2026-0022) за поддержку тестирования эпитаксиальных пластин структурными и оптическими методами. Н.А. Калюжный благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (номер темы государственного задания FFUG-2024-0026) за поддержку исследования образцов методом СЭМ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Sarantoglou, M. Skontranis, C. Mesaritikis, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **26** (5), 1900310 (2020). DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2945549
- [2] G. Sarantoglou, M. Skontranis, A. Bogris, C. Mesaritikis, Photon. Res., **9** (4), B87 (2021). DOI: 10.1364/PRJ.413371
- [3] W. Coomans, L. Gelens, S. Beri, J. Danckaert, G. Van der Sande, Phys. Rev. E, **84** (3), 036209 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevE.84.036209
- [4] A. Koen, T. Van Vaerenbergh, M. Fiers, P. Mechet, J. Dambre, P. Bienstman, Opt. Express, **21** (22), 26182 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.026182
- [5] A. Hurtado, J. Javaloyes, Appl. Phys. Lett., **107** (24), 241103 (2015). DOI: 10.1063/1.4937730
- [6] M. Maximov, Yu. Shernyakov, G. Kornyshev, A. Beckman, A. Kharchenko, N. Gordeev, O. Simchuk, V. Dubrovskii, A. Vorobyev, F. Zubov, Appl. Phys. Lett., **127** (13), 133301 (2025). DOI: 10.1063/5.0292377
- [7] B. Tykalewicz, D. Goulding, S.P. Hegarty, G. Huyet, D. Byrne, R. Phelan, B. Kelleher, Opt. Lett., **39**, 4607 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.004607

- [8] B. Kelleher, M. Dillane, E.A. Viktorov, *Light Sci. Appl.*, **10**, 238 (2021). DOI: 10.1038/s41377-021-00670-y
- [9] Н.Ю. Гордеев, А.С. Паюсов, И.С. Мухин, А.А. Серин, М.М. Кулагина, Ю.А. Гусева, Ю.М. Шерняков, Ю.М. Задиранов, М.В. Максимов, *ФТП*, **53** (2), 211 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.02.47100.8971
[N.Yu. Gordeev, A.S. Payusov, I.S. Mukhin, A.A. Serin, M.M. Kulagina, Yu.A. Guseva, Yu.M. Shernyakov, Yu.M. Zadiranov, M.V. Maximov, *Semiconductors*, **53**, 200 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619020106].