

07

Высокодобротные планарные микрорезонаторы, обеспечивающие генерацию при комнатной температуре

© А.В. Бабичев¹, И.С. Махов², Н.В. Крыжановская², М.А. Бобров¹, А.П. Васильев¹, С.А. Блохин¹,
Н.А. Малеев¹, Л.Я. Карачинский³, И.И. Новиков³, А.Ю. Егоров³

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

² Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 9 июня 2026 г.

Принято к публикации 12 июня 2026 г.

Представлены результаты реализации генерации при комнатной температуре в планарных вертикальных микрорезонаторах на основе зеркал $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. При 300 К пороговая плотность мощности и добротность на пороге генерации составили $11.4 \pm 0.7 \text{ kW/cm}^2$ и 5070 ± 160 соответственно. Двукратное превышение порога генерации привело к увеличению добротности микрорезонатора до 19 000. Эффективный латеральный теплоотвод подтвержден малым сдвигом энергии кванта, который составил 660 meV при двукратном превышении порога генерации.

Ключевые слова: микролазеры, вертикальный микрорезонатор, квантовые точки, механизм Странского–Крастанова, оптические резервуарные вычисления.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.18.63542.20758

Активные области на основе квантовых точек показали свою эффективность при формировании микро-дисковых лазеров [1], лазеров с генерацией через основное и возбужденное состояния [2], источников одиночных фотонов [3], лазеров на основе вертикального микрорезонатора [4,5]. Последний класс лазеров перспективен для создания сверхбыстрых спиновых лазеров (с модуляцией поляризации излучения) [6], устройств квантовой нанофотоники [7] и нейроморфных вычислений [8]. Резервуарные вычисления (РВ) являются одной из эффективных схем нейроморфных вычислений, что обусловлено возможностью быстрой обучаемости системы посредством линейной регрессии [8]. К настоящему моменту представлены первые результаты реализации РВ на основе массива дифракционно-связанных вертикально-излучающих лазеров [9].

Применение массива микролазеров с оптической накачкой позволяет на порядок увеличить плотность лазеров в области дифракционного связывания [8], однако низкие рабочие температуры ограничивают их применение для РВ. Переход к использованию слабопоглощающих (на длине волны накачки) распределенных брэгговских отражателей (РБО) [10] позволил реализовать генерацию при повышенных температурах как на фундаментальной моде [5], так и на модах шепчущей галереи [4]. Особого внимания заслуживают результаты реализации генерации при комнатной температуре в квазипланарном микрорезонаторе с генерацией на дефектной моде (вытравливание мелкой меза-структуры с последующим напылением диэлектрического РБО) [11],

которая позволяет реализовать латеральный теплоотвод, в сравнении с микролазерами [8].

В настоящей работе представлены результаты реализации генерации при комнатной температуре в планарном вертикальном резонаторе, где латеральное оптическое ограничение создается за счет эффекта тепловой линзы [12].

Гетероструктура вертикального микрорезонатора длиной 1λ на основе GaAs сформирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Нижний РБО включал 37.5 пар чередующихся слоев $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ толщиной 70.8 и 76.9 nm. С целью повышения усиления активной области использованы три слоя квантовых точек, сформированных методом Странского–Крастанова из слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Толщина барьерных слоев (GaAs) составляла 20 nm. Верхний РБО включал 31 пару слоев $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Распределение интенсивности поля (фундаментальной моды) внутри микрорезонатора представлено на вставке к рис. 1, а.

Наряду с исследованием планарного микрорезонатора проведено исследование микролазеров диаметром $15 \mu\text{m}$. Сухое травление на глубину $10 \mu\text{m}$ реализовано через маску на основе фоторезиста.

Оптические измерения лазеров проведены при температуре 300 К путем расположения образцов в криостате замкнутого цикла Montana Instruments Cryostation s50. Оптическая накачка осуществлена в непрерывном режиме (на длине волны 808 nm). Фокусировка и сбор излучения реализованы с помощью микрообъектива Mitutoyo MPlan Apo NIR с увеличением $20\times$ и $50\times$. Выбор 20- и 50-кратного увеличения обусловлен необхо-

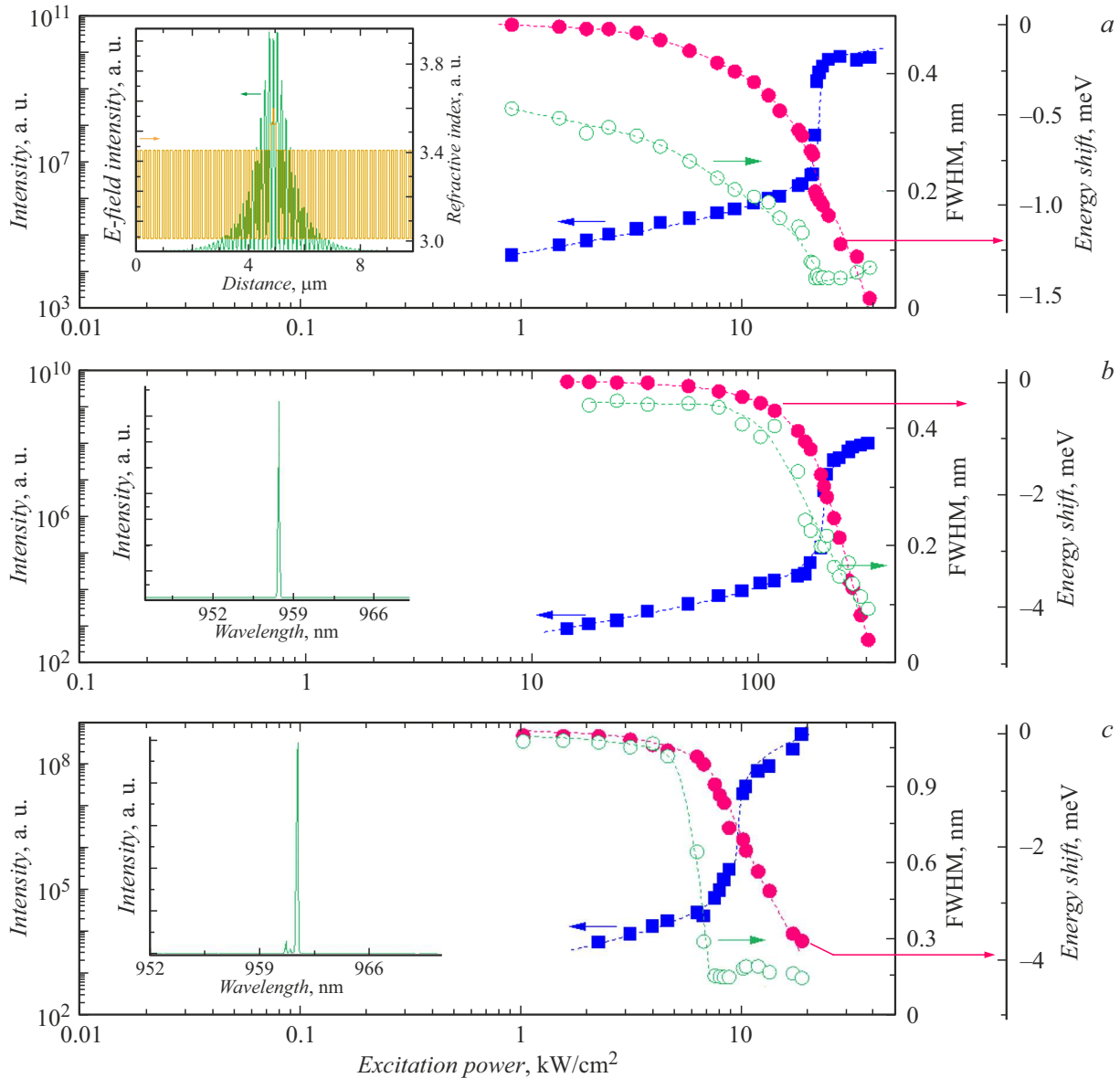


Рис. 1. Мощностная зависимость интегральной интенсивности линии люминесценции вертикальных микрорезонаторов (левая ось) и зависимости полуширины линии люминесценции (FWHM) и относительного сдвига положения энергии кванта при различных уровнях оптической накачки (правые оси). *a* и *b* — результаты для планарного микрорезонатора, диаметр пятна накачки составил 20.7 и 5.2 μm соответственно. Вставки на частях *a* и *b* демонстрируют соответственно распределение интенсивности фундаментальной моды и спектр одночастотной генерации при плотности мощности накачки 304.6 kW/cm^2 . *c* — результаты для микролазера диаметром 15 μm . Вставка на части *c* демонстрирует спектр одночастотной генерации при плотности мощности накачки 18.9 kW/cm^2 .

димостью сопоставления с результатами для микро- [13] и квазипланарных лазеров диаметром 5 μm [11]. После фокусировки диаметр пятна накачки, измеренный на поверхности планарного микрорезонатора, составлял 20.7 и 5.2 μm . Для измерения спектров люминесценции использован монохроматор Andor Shamrock 500i, оборудованный кремниевой CCD-матрицей в сочетании с дифракционной решеткой 1200 lines/mm (спектральное разрешение 0.05 nm).

Спектры люминесценции планарного микрорезонатора (при диаметре пятна накачки 20.7 μm), измеренные

при различных уровнях оптической накачки, представлены на рис. 2. При превышении порога генерации на фоне спонтанного излучения (в диапазоне длин волн 949–957 nm) в спектре люминесценции наблюдается сверхлинейный рост интенсивности моды с длиной волны ~ 957 nm. Аппроксимация интегральной интенсивности, длины волны и полуширины линии люминесценции проведены на основе распределения Гаусса/Лоренца при уровнях оптической накачки выше/ниже порога генерации [8]. Продemonстрирована явная S-образная мощностная характеристика (рис. 1, *a*), что наряду с

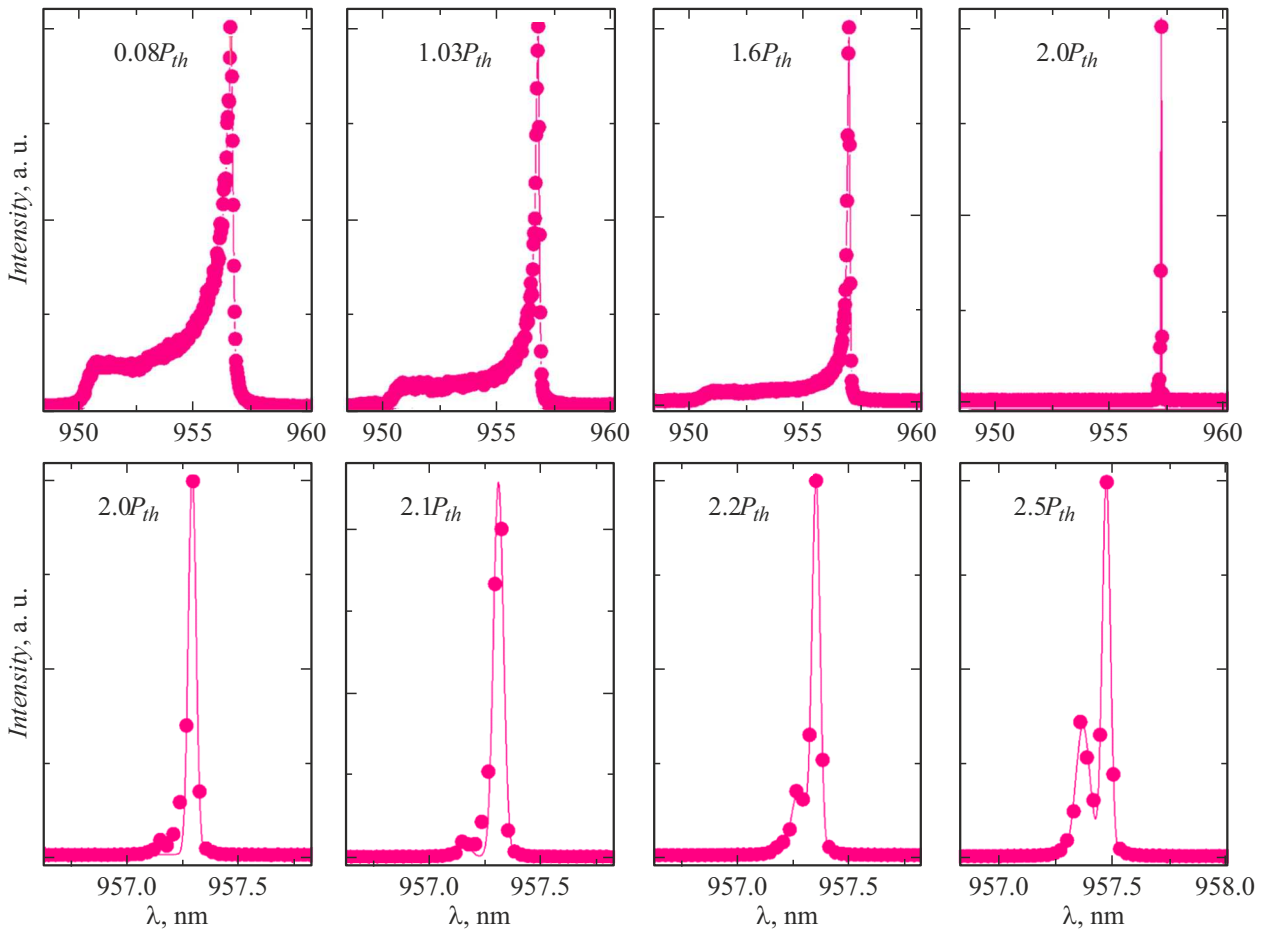


Рис. 2. Отнормированные спектры люминесценции структуры планарного микрорезонатора (при диаметре пятна накачки $20.7\ \mu\text{m}$), измеренные при 300 К.

уменьшением полуширины линии люминесценции с ростом уровня накачки свидетельствует о переходе к генерации [10]. Проведено моделирование мощностных характеристик на основе решения скоростных уравнений [8]. Зависимость плотности мощности накачки P от числа фотонов в микрорезонаторе n описывается с помощью выражения [11]:

$$P(n) = A[n(1 + \xi)(1 + \beta n)/(1 + n) - \xi\beta n],$$

где ξ — среднее число экситонов в микрорезонаторе, определенное на уровне прозрачности, β — доля спонтанного излучения в моде микрорезонатора, A — весовой фактор. Модельная кривая мощностной характеристики, определенная с помощью данного выражения с учетом величины ξ ($9 \cdot 10^{-3}$), представлена на рис. 1, а пунктирной линией. Соответствие модельной и экспериментальной кривых позволило определить величину β -фактора, равную $(1.40 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \%$. Пороговая плотность мощности P_{th} , определенная по результатам аппроксимации при условии, что число фотонов в микрорезонаторе на пороге равно единице, составила $11.4 \pm 0.7\ \text{kW/cm}^2$ (соответствует мощности

накачки $p_{th} = 34\ \text{mW}$). Значение добротности микрорезонатора (Q), оцененное на пороге генерации, составило 5070 ± 160 . Двукратное превышение P_{th} привело к росту величины Q до 19 000 (ограничено спектральным разрешением монохроматора). Дальнейшее увеличение плотности мощности накачки (до $2.5P_{th}$) привело к уменьшению интенсивности фундаментальной моды и увеличению ее полуширины, что обусловлено тепловыми эффектами [11]. Увеличение плотности мощности накачки с 25 до $37\ \text{kW/cm}^2$ приводит к сверхлинейному росту интенсивности дополнительной коротковолновой моды (рис. 2), причем наблюдается увеличение расстояния между модами (с $78.7 \cdot 10^{-3}$ до $86.2 \cdot 10^{-3}\ \text{nm}$), что типично при наличии эффекта тепловой линзы [13].

Для оценки теплового разогрева лазера проведен анализ сдвига положения моды (энергии кванта E) — величины ΔE (рис. 1, а). С увеличением уровня накачки наблюдается длинноволновый сдвиг, свидетельствующий о превалировании тепловых эффектов над плазменными [10]. Увеличение накачки до $2.0P_{th}$ привело к сдвигу энергии кванта $0.66\ \text{meV}$ (в сравнении с величиной $2.3\ \text{meV}$, обсуждаемой ранее для микрорезонаторов диаметром $5\ \mu\text{m}$ [14]). Оценочный разогрев лазера, про-

веденный с учетом температурного сдвига положения моды [5], составил 8°C . С учетом температурного сдвига показателя преломления ($4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [15]) данный разогрев соответствует скачку показателя преломления $3.2 \cdot 10^{-3}$.

Ранее для квазипланарного вертикального микрорезонатора (на основе фотонной дефектной моды диаметром $5 \mu\text{m}$) продемонстрирована генерация при 300 K [11] с пороговой плотностью накачки 156 kW/cm^2 и добротностью микрорезонатора, оцененной на пороге, 5300 . Величина β -фактора составила $1.35 \cdot 10^{-2} \%$. В связи с этим проведены исследования планарного микрорезонатора при аналогичном диаметре пятна накачки ($5.2 \mu\text{m}$). При превышении порога генерации на фоне спонтанного излучения (в диапазоне $949\text{--}959 \text{ nm}$) наблюдается сверхлинейный рост интенсивности линии люминесценции на длине волны $\sim 955 \text{ nm}$ (рис. 1, *b*). Анализ *S*-образной мощностной характеристики позволил определить пороговую плотность мощности, которая составила $95.2 \pm 5.8 \text{ kW/cm}^2$ ($P_{th} = 20 \text{ mW}$). β -фактор равен $(5.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \%$. Значения Q при уровне накачки $1.0P_{th}$, $2.0P_{th}$ и $3.2P_{th}$ составили 2500 , 4800 и 10400 соответственно. Анализ сдвига положения энергии кванта (рис. 1, *b*) показал, что увеличение уровня накачки с $1.0P_{th}$ до $2.0P_{th}$ приводит к длинноволновому сдвигу, соответствующему 3.83 meV , что свидетельствует о значительном разогреве при фокусировке в пятно диаметром $5 \mu\text{m}$.

Для сравнительного анализа наряду с планарным микрорезонатором проведено исследование микролазера диаметром $15 \mu\text{m}$ (рис. 1, *c*). Спектры люминесценции представлены набором мод в диапазоне $951\text{--}960 \text{ nm}$. Для линии люминесценции с длиной волны $\sim 959.4 \text{ nm}$ продемонстрирована явная *S*-образная мощностная характеристика наряду с уменьшением полуширины линии люминесценции с ростом накачки. Оценочные пороговая мощность и β -фактор составили $4.9 \pm 0.3 \text{ kW/cm}^2$ и $(3.40 \pm 0.12) \cdot 10^{-3} \%$. β -фактор определяется с помощью выражения $\beta = F_p / (F_p + 1)$ [14]. Величина фактора Парселла (F_p) прямо и обратно пропорциональна добротности и объему моды (V_m) соответственно. Таким образом, меньшее пороговое значение (в сравнении с планарным микрорезонатором) обусловлено уменьшением объема моды V_m (латеральное ограничение при травлении микролазера) [5]. Значения Q при уровне накачки $1.0P_{th}$ и $2.0P_{th}$ составили 1490 ± 190 и 5200 ± 230 . Меньшие значения добротности в сравнении с добротностью планарного микрорезонатора обусловлены дополнительным рассеянием на боковой стенке микролазера [16]. Двукратное превышение порога генерации привело к длинноволновому сдвигу, соответствующему 1.5 meV . Таким образом, величина разогрева микролазера диаметром $15 \mu\text{m}$ выше, чем в планарном микрорезонаторе, но ниже, чем в микролазере диаметром $5 \mu\text{m}$ [14], что соотносится с ранее представленными результатами для вертикально-излучающих лазеров с токовой накачкой [17].

В заключение отметим, что в работе представлены первые результаты реализации генерации при комнатной температуре в планарном микрорезонаторе. Благодаря использованию планарной геометрии удалось снизить разогрев лазера в сравнении с микролазерами диаметром 5 [14] и $15 \mu\text{m}$. При диаметре пятна накачки $20 \mu\text{m}$, аналогичном ранее обсуждавшемуся для микролазеров [14], пороговая мощность накачки составила $11.4 \pm 0.7 \text{ kW/cm}^2$ в сравнении с 6.1 ± 0.4 [14] и $4.9 \pm 0.3 \text{ kW/cm}^2$ для микролазеров диаметром 5 [14] и $15 \mu\text{m}$. Добротность микрорезонатора, определенная на пороге генерации, составила 5070 ± 160 в сопоставлении с 8100 ± 400 [14] и 1490 ± 190 для микролазеров диаметром 5 [14] и $15 \mu\text{m}$. β -фактор составил $(1.40 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \%$ в сравнении с $(2.40 \pm 0.08) \cdot 10^{-2} \%$ [14] и $(3.40 \pm 0.12) \cdot 10^{-3} \%$ для микролазеров диаметром 5 [14] и $15 \mu\text{m}$.

Финансирование работы

А.В. Бабичев, А.П. Васильев, С.А. Блохин благодарят за финансовую поддержку Российский научный фонд (проект № 22-19-00221-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00221/>) в части эпитаксии гетероструктуры, измерения и анализа спектров люминесценции. И.С. Махов, Н.В. Крыжановская благодарят за поддержку Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (проект № HSE-BR-2025-069) в части исследования тестовых структур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Zhukov, A. Nadtochiy, A. Karaborchev, N. Fominykh, I. Makhov, K. Ivanov, Yu. Guseva, M. Kulagina, S. Blokhin, N. Kryzhanovskaya, *Opt. Lett.*, **49** (2), 330 (2024). DOI: 10.1364/OL.509297
- [2] M. Dillane, E.A. Viktorov, B. Kelleher, *Opt. Lett.*, **48** (1), 21 (2023). DOI: 10.1364/ol.475805
- [3] A. Galimov, M. Bobrov, M. Rakhlin, Yu. Serov, D. Kazanov, A. Veretennikov, G. Klimko, S. Sorokin, I. Sedova, N. Maleev, Yu. Zadiranov, M. Kulagina, Yu. Guseva, D. Berezina, E. Nikitina, A. Toropov, *Nanomaterials*, **13** (9), 1572 (2023). DOI: 10.3390/nano13091572
- [4] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, S. Troshkov, Yu. Zadiranov, Yu. Salii, M. Kulagina, M. Bobrov, A. Vasil'ev, S. Blokhin, N. Maleev, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Egorov, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **31** (2), 1502808 (2025). DOI: 10.1109/JSTQE.2024.3503724
- [5] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, A. Blokhin, Yu. Zadiranov, Yu. Salii, M. Kulagina, M. Bobrov, A. Vasil'ev, S. Blokhin, N. Maleev, M. Tchernycheva, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Egorov, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **31** (5), 1900208 (2025). DOI: 10.1109/jstqe.2024.3494245

- [6] M. Lindemann, G. Xu, T. Pusch, R. Michalzic, M.R. Hofmann, I. Žutić, N.C. Gerhardt, *Nature*, **568** (7751), 212 (2019). DOI: 10.1038/s41586-019-1073-y
- [7] T. Heindel, J.-H. Kim, N. Gregersen, A. Rastelli, S. Reitzenstein, *Adv. Opt. Photon.*, **15** (3), 613 (2023). DOI: 10.1364/aop.490091
- [8] T. Heuser, J. Grose, S. Holzinger, M.M. Sommer, S. Reitzenstein, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **26** (1), 1900109 (2020). DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2925968
- [9] M. Pflüger, D. Brunner, T. Heuser, J.A. Lott, S. Reitzenstein, I. Fischer, *Opt. Lett.*, **49** (9), 2285 (2024). DOI: 10.1364/ol.518946
- [10] C.-W. Shih, I. Limame, S. Krüger, C.C. Palekar, A. Koulas-Simos, D. Brunner, S. Reitzenstein, *Appl. Phys. Lett.*, **122** (15), 151111 (2023). DOI: 10.1063/5.0143236
- [11] K. Gaur, S. Tripathi, F. Laudani, A. Barua, I. Limame, A. Koulas-Simos, S. Rodt, S. Reitzenstein, *Laser Photon. Rev.*, **19** (18), e00533 (2025). DOI: 10.1002/lpor.202500533
- [12] S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, J.A. Lott, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, A.G. Gladyshev, A.M. Nadtochiy, E.V. Nikitina, V.G. Tikhomirov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, *Proc. SPIE*, **8276**, 82760W (2012). DOI: 10.1117/12.907346
- [13] R. Michalzic, in *VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers*, ed. by R. Michalzic. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Berlin–Heidelberg, 2012), p. 19–75. DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0_2
- [14] A. Babichev, A. Blokhin, Yu. Zadiranov, Yu. Salii, M. Kulagina, M. Bobrov, A. Vasil'ev, S. Blokhin, N. Maleev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Egorov, *Appl. Phys. Lett.*, **128** (5), 051105 (2026). DOI: 10.1063/5.0311163
- [15] M. Brunner, K. Gulden, R. Hövel, M. Moser, M. Illegems, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 7 (2000). DOI: 10.1063/1.125638
- [16] I. Limame, C.-W. Shih, A. Koulas-Simos, J. Pietsch, L.J. Roche, M. Plattner, A. Koltchanov, S. Rodt, S. Reitzenstein, *Opt. Express*, **32** (18), 31819 (2024). DOI: 10.1364/OE.529679
- [17] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, I.O. Zhumaeva, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, N.N. Ledentsov, *IEEE J. Quantum Electron.*, **58** (2), 2400115 (2022). DOI: 10.1109/JQE.2022.3141418