

07

Одночастотная генерация лазеров на основе вертикального микрорезонатора при комнатной температуре

© А.В. Бабичев¹, И.С. Махов², Н.В. Крыжановская², Ю.М. Задиранов¹, Ю.А. Салий¹, М.М. Кулагина¹, А.А. Блохин¹, 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 11 марта 2026 г.

В окончательной редакции 20 марта 2026 г.

Принято к публикации 24 марта 2026 г.

Реализована одночастотная генерация при 300 К в лазерах на основе вертикального микрорезонатора. Для лазеров с полупроводниковым выводным зеркалом пороговая плотность мощности накачки составила 6.5 kW/cm^2 . Добротность микрорезонатора и длина волны излучения, определенные на пороге генерации, равнялись 8800 и $\sim 959.8 \text{ nm}$. Применение конструкции микрорезонатора с гибридным выводным зеркалом позволило повысить добротность микрорезонатора (до 12 360) и снизить пороговую плотность мощности накачки (до 6.0 kW/cm^2). Для лазера с гибридным выводным зеркалом сдвиг энергии кванта при двукратном превышении порога генерации составил 220 meV .

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

DOI: 10.61011/PJTF.2026.12.62984.20677

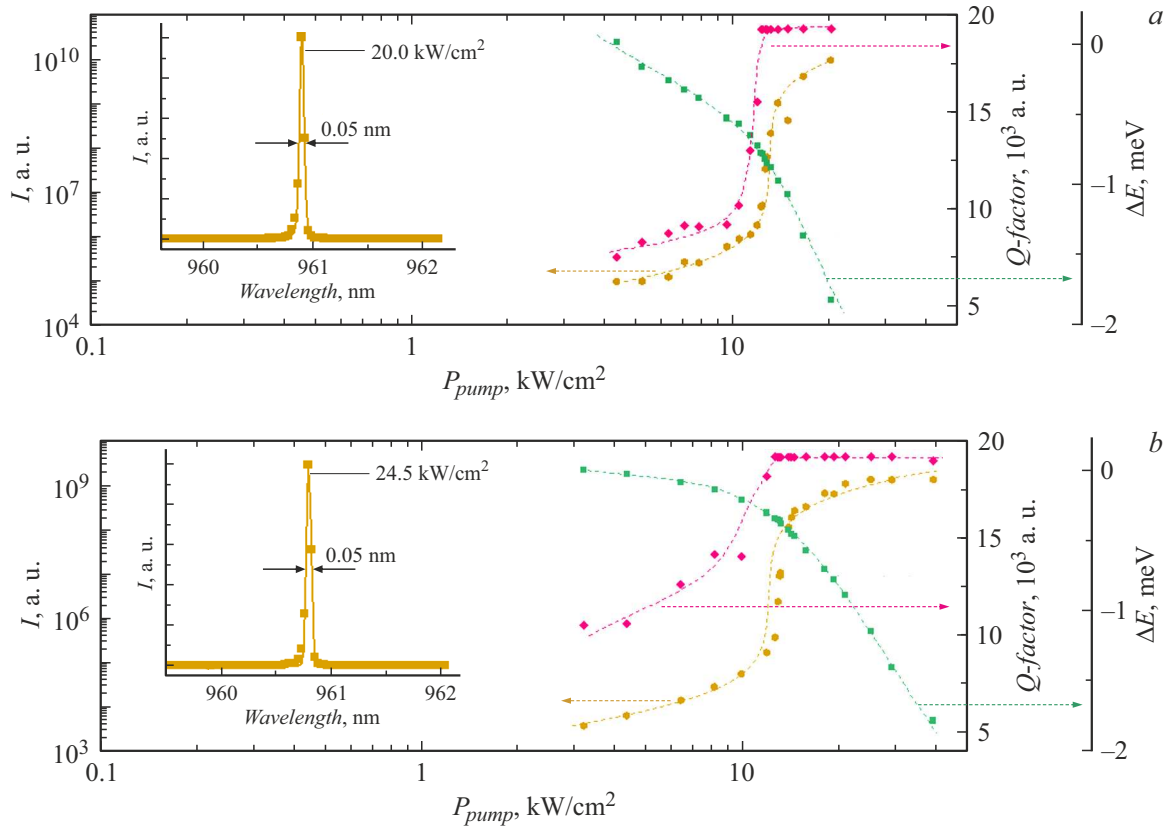
Поверхностно-излучающие лазеры на основе вертикального микрорезонатора перспективны в качестве источников лазерного излучения для реализации схемы фотонных резервуарных вычислений [1–4], в том числе с дифракционным связыванием. В качестве источников излучения могут выступать вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) с токовой и оптической накачкой [4]. Дифракционное связывание в массиве ВИЛ с токовой накачкой реализовано как для монолитных ВИЛ с длиной волны генерации 980 nm [5–9], так и для ВИЛ с длиной волны генерации 1300 nm [10,11], полученных по технологии спекания пластин [12–14]. Сложность компенсации разброса длины волны генерации в массиве ВИЛ с токовой накачкой [4], а также значительный шаг их расположения на пластине [4] ограничивают максимальное число элементов в массиве (24 лазера в массиве [8]).

Применение вертикальных микрорезонаторов с оптической накачкой позволяет на порядок повысить плотность упаковки (шаг расположения микролазеров в массиве $\sim 8 \mu\text{m}$ [4]) в сравнении с ВИЛ с токовой накачкой. Недостаток применения подхода для резервуарных вычислений состоит в низких рабочих температурах (130 К для микрорезонаторов на основе зеркал $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ [15]). Для структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), использование слабопоглощающих (на длине волны лазера, используемого для накачки) зеркал позволило впервые реализовать генерацию в микролазерах при комнатной температуре [16]. При этом следует отметить

значительный сдвиг линии генерации с ростом уровня накачки, обусловленный тепловым разогревом микролазеров. В свою очередь максимальная температура, при которой продемонстрирована генерация в микролазерах, сформированных методом газофазной эпитаксии, не превышает 200 К [17].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по формированию лазеров на основе вертикального микрорезонатора с генерацией при комнатной температуре, обеспечивающих малый сдвиг положения линии генерации с увеличением уровня оптической накачки.

Для эпитаксии гетероструктуры высокодобротного вертикального микрорезонатора использован метод МПЭ. GaAs -микрорезонатор с оптической длиной λ/n сформирован на основе зеркал $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ с числом пар в верхнем и нижнем зеркале 37.5 и 32.0. Использована активная область на основе трех слоев квантовых точек InGaAs , самоорганизация которых проведена по методу Странского–Крастанова из слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ [16]. В эксперименте исследованы лазеры диаметром $15 \mu\text{m}$. С целью дополнительного повышения добротности микрорезонатора проведено формирование гибридного выводного зеркала, что позволило удвоить добротность микрорезонатора (без учета поглощения активной области) в сравнении с добротностью полупроводникового микрорезонатора [16]. Гибридное выводное зеркало сформировано за счет магнетронного напыления двух пар $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ на поверхность полупроводникового микрорезонатора.



Мощностная зависимость интегральной интенсивности линии люминесценции вертикального микрорезонатора с полупроводниковым (a) и гибридным (b) выводным зеркалом (левая ось) и зависимости полуширины линии люминесценции и относительного сдвига положения энергии кванта ΔE при различных уровнях оптической накачки (правые оси). На вставках представлены спектры одночастотной генерации при плотностях мощности накачки 20.0 (a) и 24.5 kW/cm² (b).

Для оптических измерений образцов использован криостат Montana Instruments Cryostation s50. В качестве лазера для оптической накачки применен полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 808 nm (непрерывный режим накачки). Фокусировка излучения осуществлена микрообъективом Mitutoyo MPlan Apo NIR. Для регистрации спектров люминесценции использован монохроматор Andor Shamrock 500i grating. Дифракционная решетка (1200 lines/mm) обеспечила спектральное разрешение системы ~ 0.05 nm. Для регистрации сигнала использована охлаждаемая кремниевая CCD-матрица Andor DU 401A BVF.

При 300 K в спектрах люминесценции микролазеров с полупроводниковым и гибридным выводным зеркалом продемонстрирован сверхлинейный рост интенсивности длинноволновой линии, соответствующей резонансной длине волны вертикального микрорезонатора, с увеличением уровня оптической накачки. На рисунке приведены зависимости интегральной интенсивности и полуширины линии люминесценции при различных плотностях мощности накачки для вертикального микрорезонатора с полупроводниковым (a) и гибридным (b) выводным зеркалом (аппроксимация с помощью функции Фойгта [16]). На вставках представлены типичные спектры одночастотной генерации.

Сверхлинейный рост интегральной интенсивности излучения пика люминесценции на длине волны 958 nm с ростом уровня оптической накачки продемонстрирован на рисунке, a. S-образный тип мощностной характеристики (в двойном логарифмическом масштабе) наряду с заужением линии люминесценции свидетельствует о переходе к лазерной генерации [16] в микрорезонаторе с полупроводниковым выводным зеркалом.

Для оценки порога генерации проведена аппроксимация входной-выходной характеристики с использованием выражения [18–20]:

$$I(p) = A[Bp(1+\xi)(1+\beta Bp)/(1+Bp) - \xi\beta Bp],$$

где $I(p)$ — зависимости интенсивности накачки от числа экситонов в микрорезонаторе p , $\xi = n_0\beta/\gamma\tau_{sp}$, $\gamma = 2\pi c/Q$, A и B — входной и выходной факторы масштабирования, β — доля спонтанного в стимулированном излучении. Величина n_0 характеризует число носителей при уровне накачки, соответствующем прозрачности, τ_{sp} — время жизни спонтанного излучения, c — скорость света, Q — величина добротности микрорезонатора. Результат аппроксимации экспериментальных кривых представлен на рисунке пунктирными линиями. Порог генерации оценен в предположении, что среднее число

фотонов в микрорезонаторе, определенное на пороге генерации, равно единице [17]:

$$I = A[(1 + \xi)(1 + \beta)/2 - \xi\beta].$$

Пороговая плотность мощности накачки (P_{th}) для микролазера с полупроводниковым выводным зеркалом составила 6.5 kW/cm^2 . Длина волны излучения и добротность на пороге генерации равнялись 959.76 nm и 8800 . Повышение уровня накачки до $1.9P_{th}$ привело к сужению линии люминесценции как минимум до 0.05 nm . Данное значение полуширины линии генерации соответствует добротности микрорезонатора $\geq 19\,200$. Дальнейшее повышение уровня оптической накачки до $3.1P_{th}$ не приводит к уширению линии люминесценции, типичному при использовании поглощающих на длине волны накачки зеркал (на основе $\text{GaAs/Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$), обусловленному значительным тепловым нагревом образца.

С целью оценки разогрева лазера проведен анализ сдвига положения линии генерации (энергии кванта) с увеличением уровня оптической накачки (см. рисунок, *a*). Двукратное превышение порога генерации привело к сдвигу положения энергии кванта (ΔE) относительно порога генерации ($-620 \mu\text{eV}$). Данный длинноволновый сдвиг в 3.5 раза меньше аналогичной величины для микролазеров с диаметром $5 \mu\text{m}$ [16], что обусловлено увеличением диаметра лазера до $15 \mu\text{m}$ и, как следствие, меньшим разогревом для лазеров большего диаметра аналогично случаю ВИЛ с токовой накачкой [12]. Трехкратное превышение порога генерации привело к увеличению значения ΔE (относительно порога генерации) до 1.46 meV . С учетом температурного сдвига положения линии генерации, определенного на пороге генерации ($-71 \mu\text{eV/K}$), проведена оценка разогрева лазера. Повышение плотности мощности накачки в 3 раза приводит к разогреву $\sim 20^\circ\text{C}$.

Для микролазера с гибридным выводным зеркалом значение P_{th} составило 6.0 kW/cm^2 (см. рисунок, *b*). Длина волны излучения и добротность на пороге генерации равнялись 960.0 nm и $12\,360$. В сравнении с добротностью микролазера на основе полупроводникового выводного зеркала добротность микрорезонатора увеличена в 1.4 раза. Повышение уровня оптической накачки до $2.0P_{th}$ привело к сужению линии люминесценции как минимум до 0.05 nm . Уширения линии генерации с ростом уровня накачки (до $6.0P_{th}$) не продемонстрировано. Показано, что двукратное превышение порога генерации привело к сдвигу положения энергии кванта относительно порога генерации, равному $220 \mu\text{eV}$ (в сравнении со сдвигом $620 \mu\text{eV}$, обсуждаемым для микролазера с полупроводниковым выводным зеркалом). Данный эффект может быть обусловлен повышением добротности вертикального микрорезонатора и, как следствие, меньшим разогревом. С ростом уровня накачки до $6.0P_{th}$ сдвиг положения энергии кванта относительно порога генерации составил 1.64 meV , что соответствует оценочному разогреву $\sim 23^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение плотности

мощности накачки (до 50 kW/cm^2) приводит к тепловому разогреву ($\Delta E = 2.2 \text{ meV}$ относительно порога генерации), который в 1.6 – 2.0 раза меньше, чем в случае микролазеров диаметром $5 \mu\text{m}$ ($\Delta E = 3.5$ – 4.5 meV) [16], что обусловлено меньшим разогревом для лазеров большего диаметра, обсуждаемым выше.

Таким образом, представлены первые результаты реализации генерации при комнатной температуре в микролазерах диаметром $15 \mu\text{m}$ на основе зеркал $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Для конструкций вертикального микрорезонатора на основе полупроводникового и гибридного выводного зеркала реализована генерация при 300 K . Увеличение диаметра вертикального микрорезонатора позволило в 5 раз (при двукратном превышении порога [16]) снизить разогрев лазера, обусловленный поглощением в слоях гетероструктуры при оптической накачке, в сравнении с разогревом микролазеров диаметром $5 \mu\text{m}$ [16].

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, формирования микролазеров, измерения спектров люминесценции. И.С. Махов, Н.В. Крыжановская благодарят за поддержку Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в части исследования тестовых структур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Bueno, S. Maktoobi, L. Froehly, I. Fischer, M. Jacquot, L. Larger, D. Brunner, *Optica*, **5** (6), 756 (2018). DOI: 10.1364/optica.5.000756
- [2] D. Brunner, I. Fischer, *Opt. Lett.*, **40** (16), 3854 (2015). DOI: 10.1364/ol.40.003854
- [3] H. Wang, J. Hu, Y. Baek, Y.S. Baek, K. Tsuchiyama, M. Joly, Q. Liu, S. Gigan, *Light Sci. Appl.*, **14**, 245 (2025). DOI: 10.1038/s41377-025-01927-6
- [4] T. Heuser, J. Große, S. Holzinger, M.M. Sommer, S. Reitzenstein, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **26** (1), 1900109 (2020). DOI: 10.1109/jstqe.2019.2925968
- [5] G. Pan, M. Xun, X. Zhou, Y. Sun, Y. Dong, D. Wu, *Light Sci. Appl.*, **13** (1), 229 (2024). DOI: 10.1038/s41377-024-01561-8
- [6] Z. Chen, A. Sludds, R. Davis, I. Christen, L. Bernstein, L. Ateshian, T. Heuser, N. Heermeier, J.A. Lott, S. Reitzenstein, R. Hamerly, D. Englund, *Nat. Photon.*, **17** (8), 723 (2023). DOI: 10.1038/s41566-023-01233-w
- [7] M. Pflüger, D. Brunner, T. Heuser, J.A. Lott, S. Reitzenstein, I. Fischer, *Opt. Express*, **31** (5), 8704 (2023). DOI: 10.1364/oe.473449
- [8] M. Pflüger, D. Brunner, T. Heuser, J.A. Lott, S. Reitzenstein, I. Fischer, *Opt. Lett.*, **49** (9), 2285 (2024). DOI: 10.1364/ol.518946

- [9] N. Heermeier, M. Janczak, J.A. Lott, T. Czyszanowski, S. Reitzenstein, *Optica*, **12** (12), 1961 (2025). DOI: 10.1364/optica.574734
- [10] C.M. Long, L. Mutter, B. Dwir, A. Mereuta, A. Caliman, A. Sirbu, V. Iakovlev, E. Kapon, *Opt. Express*, **22** (18), 21137 (2014). DOI: 10.1364/oe.22.021137
- [11] C.M. Long, Z. Mickovic, D. Ellafi, B. Dwir, V. Iakovlev, A. Sirbu, A. Mereuta, A. Caliman, E. Kapon, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21** (6), 659 (2015). DOI: 10.1109/jstqe.2015.2445212
- [12] A.V. Babichev, Y.N. Kovach, S.A. Blokhin, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.Yu. Egorov, S.-C. Tian, D. Bimberg, *J. Phys. Photon.*, **7** (3), 032001 (2025). DOI: 10.1088/2515-7647/ade5de
- [13] A. Babichev, S. Blokhin, A. Gladyshev, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Blokhin, M. Bobrov, Y. Kovach, A. Kuzmenkov, V. Nevedomsky, N. Maleev, E. Kolodeznyi, K. Voropaev, A. Vasilyev, V. Ustinov, A. Egorov, S. Han, S.-C. Tian, D. Bimberg, *Photonics*, **10** (6), 660 (2023). DOI: 10.3390/photonics10060660
- [14] С.А. Блохин, М.А. Бобров, А.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, Н.А. Малеев, В.М. Устинов, Е.С. Колодезный, С.С. Рочас, А.В. Баби́чев, И.И. Новиков, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионов, А.Ю. Егоров, *ФТП*, **53** (8), 1128 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.08.48006.9112 [S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, E.S. Kolodeznyi, S.S. Rochas, A.V. Babichev, I.I. Novikov, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, *Semiconductors*, **53** (8), 1104 (2019). DOI: 10.1134/s1063782619080074].
- [15] L. Andreoli, X. Porte, T. Heuser, J. Große, B. Moeglen-Paget, L. Furfaro, S. Reitzenstein, D. Brunner, *Opt. Express*, **29** (6), 9084 (2021). DOI: 10.1364/oe.417063
- [16] A. Babichev, A. Blokhin, Y. Zadiranov, Y. 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
- [17] 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
- [18] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, Y. Kovach, A. Blokhin, Y. Zadiranov, Y. Salii, M. Kulagina, M. Bobrov, A. Vasil'ev, S. Blokhin, N. Maleev, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Egorov, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **32** (6), 1700208 (2026). DOI: 10.1109/jstqe.2026.3662809
- [19] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, S. Troshkov, Y. Zadiranov, Y. Salii, M. Kulagina, M. Bobrov, A. Vasil'ev, S. Blokhin, N. Maleev, L. Karachinsky, A. Egorov, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **31** (2), 1502808 (2025). DOI: 10.1109/jstqe.2024.3503724
- [20] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, S. Troshkov, Y. Zadiranov, Y. Salii, M. Kulagina, M. Bobrov, A. Vasil'ev, S. Blokhin, N. Maleev, L. Karachinsky, A. Egorov, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **31** (5), 1900208 (2025). DOI: 10.1109/jstqe.2024.3494245