07

Поверхностная генерация в микролазерах на основе вертикального микрорезонатора

© А.В. Бабичев[1], И.С. Махов[2], Н.В. Крыжановская[2], Ю.М. Задиранов[1], Ю.А. Салий[1], М.М. Кулагина[1], Я.Н. Ковач[1,3], М.А. Бобров[1], А.П. Васильев[1], С.А. Блохин[1], Н.А. Малеев[1], Л.Я. Карачинский[3], И.И. Новиков[3], А.Ю. Егоров[3]

[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 14 июля 2025 г.
В окончательной редакции 6 августа 2025 г.
Принято к публикации 11 августа 2025 г.

Продемонстрирована генерация в микролазерах на основе вертикального микрорезонатора при температуре 244 K. Пороговая поглощенная оптическая мощность, длина волны генерации и добротность микролазера с диаметром $4\,\mu$m составили ~ 2.8 mW, 989 nm и 12 000 соответственно. Минимальная пороговая поглощенная оптическая мощность ($250\,\mu$W) соответствует температуре 168 K.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2025.21.61531.20443

Нейроморфные вычисления являются одной из альтернатив архитектуре фон Неймана [1]. Имитация биологических нейронных систем перспективна при решении задач обучения в режиме реального времени и сверхбыстрого распознавания изображений/образов [2]. Резервуарные вычисления (РВ) являются одним из мощных видов нейроморфных вычислений [3–6], что связано с возможностью эффективного обучения системы (system training) посредством линейной регрессии и классификации [2]. В сравнении с электронными оптические РВ перспективны с точки зрения обеспечения высокой скорости (GHz-полоса пропускания) и масштабируемости [2,7]. Одна из реализаций схемы оптических РВ — массив дифракционно-связанных лазеров [8]. Оптические РВ могут быть реализованы на основе массива вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ), но максимальный размер резервуара составляет 24 элемента [9] и ограничен низкой плотностью расположения ВИЛ [9]. Микролазеры на основе вертикального резонатора с оптической накачкой позволяют существенно повысить плотность расположения в массиве, обеспечивающем дифракционное связывание [2]. Однако генерация таких микролазеров при комнатной температуре не была продемонстрирована. Максимальная температура, при которой продемонстрирована генерация, составила 220 K [10].

В настоящей работе представлены первые результаты по реализации генерации при повышенных температурах (до 244 K) в микролазерах на основе вертикального микрорезонатора.

Для получения гетероструктуры микрорезонатора был использован метод молекулярно-пучковой эпитаксии. Нижний и верхний распределенные брэгговские отражатели (РБО) включали соответственно 35 и 27 пар четвертьволновых по толщине слоев $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, не поглощающих на длине волны излучения лазера накачки. Три слоя квантовых точек (КТ) формировались по методу Странского–Крастанова из слоя $In_{0.5}Ga_{0.5}As$. Слои КТ разделены GaAs-барьерами толщиной 20 nm с целью исключения связывания. Слои КТ располагались в центре вертикального микрорезонатора длиной $1\lambda/n$, где λ — длина волны генерации, n — эффективный показатель преломления. Методы контактной литографии и сухого травления использованы для формирования микролазеров. Слои SiO_2/Ta_2O_5 использованы в качестве антиотражающего покрытия.

Температурные измерения спектров микрофотолюминесценции (микроФЛ) проведены при размещении образцов в оптическом криостате Montana Instruments Cryostation s50. Оптическая накачка осуществлялась полупроводниковым лазером с длиной волны генерации 808 nm. Микрообъектив с 100-кратным увеличением использован для накачки и сбора излучения. Размер пятна накачки составлял $1-2\,\mu$m. Для регистрации спектров микроФЛ использован монохроматор Andor Shamrock 500i grating с фокусным расстоянием 500 mm. Для регистрации излучения применена охлаждаемая кремниевая CCD-матрица Andor DU 401A BVF. Использование дифракционной решетки 1200 штрихов на 1 mm обеспечило спектральное разрешение 0.05 nm.

Проведено измерение спектров микроФЛ в диапазоне температур 77–260 K. При 77 K наблюдается сверхлинейный рост интенсивности люминесценции с увеличе-

нием уровня накачки для линии 981 nm (см. вставку на рис. 1). Была обнаружена S-образная зависимость выходной оптической мощности P_{out} от мощности оптической накачки P_{pump} (мощностная характеристика), что наряду с сужением полуширины линии (рис. 1) люминесценции с ростом уровня оптической накачки свидетельствует о переходе к лазерной генерации [11–13]. Вблизи порогового значения добротность вертикального микрорезонатора составила 13 400 и превышает ранее представленные значения 12 200 для микролазера диаметром 3.6 μm [11]. Повышение уровня оптической накачки приводит к росту добротности микрорезонатора до $\sim 20\,000$, при этом данное значение ограничено спектральным разрешением монохроматора.

Аналогичная S-образная мощностная характеристика продемонстрирована при температурах 168, 205, 226 и 244 K (рис. 1). Дальнейшее повышение температуры (до 260 K) приводит к линейной зависимости интенсивности люминесценции от уровня оптической накачки. При температурах 168, 205, 226 и 244 K добротность микрорезонатора, определенная вблизи порогового значения, составила 13 500, 15 000, 11 700 и 11 800 соответственно. Максимальная добротность микрорезонатора была $Q_{\max} \geq 20\,000$, за исключением измерений при температуре 244 K, где величина $Q_{\max} = 18\,000$.

Мощностная S-образная характеристика может быть аппроксимирована за счет решения скоростных уравнений [11,12]:

$$P_{pump} = \Gamma/\beta[1 + \xi + 2\beta(P_{out} - \xi/2)]P_{out}/(1 + P_{out}),$$

где P_{pump} и P_{out} — мощность оптической накачки и выходная оптическая мощность, Γ — скорость выброса фотонов из „холодного“ резонатора, β — фактор, определяющий долю спонтанного излучения в лазерной моде, ξ — параметр, характеризующий число фотонов в лазерной моде при достижении порога прозрачности. Для определения величины ξ была выполнена аппроксимация полуширины линии генерации (full width at half maximum, FWHM) в зависимости от уровня оптической накачки в допороговом режиме на основе выражения $\mathrm{FWHM} = \hbar\Gamma(1 + \xi)/(1 + 2P_{out})$, где $\hbar$ — приведенная постоянная Планка. Величина $1/\Gamma$ определяется как сумма обратных величин добротности микрорезонатора в допороговом режиме и при максимальном уровне оптической накачки. Результат аппроксимации представлен на рис. 1. Пороговая мощность накачки P_{th} определяется с помощью выражения [11,12]:

$$P_{th} = \Gamma/\beta[1 + \xi + 2\beta(1 - \xi/2)]/2.$$

Пороговая поглощенная мощность определяется из пороговой мощности накачки домножением на эффективный коэффициент поглощения накачки κ. Последняя величина определяется как произведение коэффициента пропускания верхнего РБО и коэффициента поглощения слоев РБО на длине волны накачки.

Зависимость пороговой мощности от температуры представлена на рис. 2, *a*. При 77 K величина P_{th} составила 2.7 mW. Минимальное значение пороговой мощности оптической накачки соответствует температуре 168 K и составляет 1.7 mW. Дальнейшее повышение температуры приводит к росту величины P_{th}. При температуре 244 K пороговая мощность накачки составила ~ 18 mW. Проведенная оценка пороговой поглощенной оптической мощности на основе подхода, рассмотренного ранее в работах [11,14], позволила получить значения $\sim 250\,\mu$W (83 μW на слой КТ) и 2.8 mW (930 μW на слой КТ) при температурах 168 и 244 K соответственно.

Зависимость длины волны генерации, определенной вблизи порога генерации, от температуры представлена на рис. 2, *a*. Повышение температуры приводит к длинноволновому сдвигу длины волны генерации со средней скоростью сдвига по температуре 0.05 nm/K. Было также проведено измерение положения провала (dip) в спектре отражения гетероструктуры вертикального микрорезонатора при различных температурах. Показано, что температурный сдвиг положения провала в спектре отражения составляет 0.041 nm/K. Данные различия в температурном сдвиге двух величин могут быть обусловлены разогревом образца. В пользу данного вывода также свидетельствует уширение линии генерации при высоких уровнях оптической накачки, которое отмечалось ранее (см. работу [11]) и продемонстрировано в эксперименте при мощности накачки > 60 mW при 205 K и > 20 mW при температуре ≥ 226 K.

С целью оценки разогрева образца был проведен анализ сдвига положения линии генерации (ΔE) в зависимости от уровня оптической накачки при различных температурах (рис. 2, *b*). При 77 K повышение уровня оптической накачки до 5 mW приводит к коротковолновому сдвигу длины волны излучения на 96 μeV, что обусловлено увеличением концентрации носителей заряда. Ранее в работе [11] для микролазеров с диаметром 3.6 μm был продемонстрирован больший сдвиг длины волны генерации ($-150\,\mu$eV при 2 mW). Для исследованного микролазера аналогичный сдвиг длины волны генерации ($-150\,\mu$eV) наблюдается при уровне оптической накачки 60 mW. Повышение накачки до 160 mW приводит к длинноволновому сдвигу длины волны генерации, который составляет $-640\,\mu$eV. Увеличение температуры до 168 K приводит к сужению диапазона оптической накачки, в котором наблюдается коротковолновый сдвиг положения линии генерации, до 1 mW. Дальнейший рост температуры до 205 K приводит к превалированию тепловых эффектов и отсутствию области коротковолнового сдвига положения линии генерации. По положению линии люминесценции в допороговом режиме накачки оценена величина сдвига линии люминесценции с температурой, которая составила 0.048 nm/K.

Была проведена оценка изменения температуры при максимальном уровне накачки 160 mW. При 77 K сдвиг

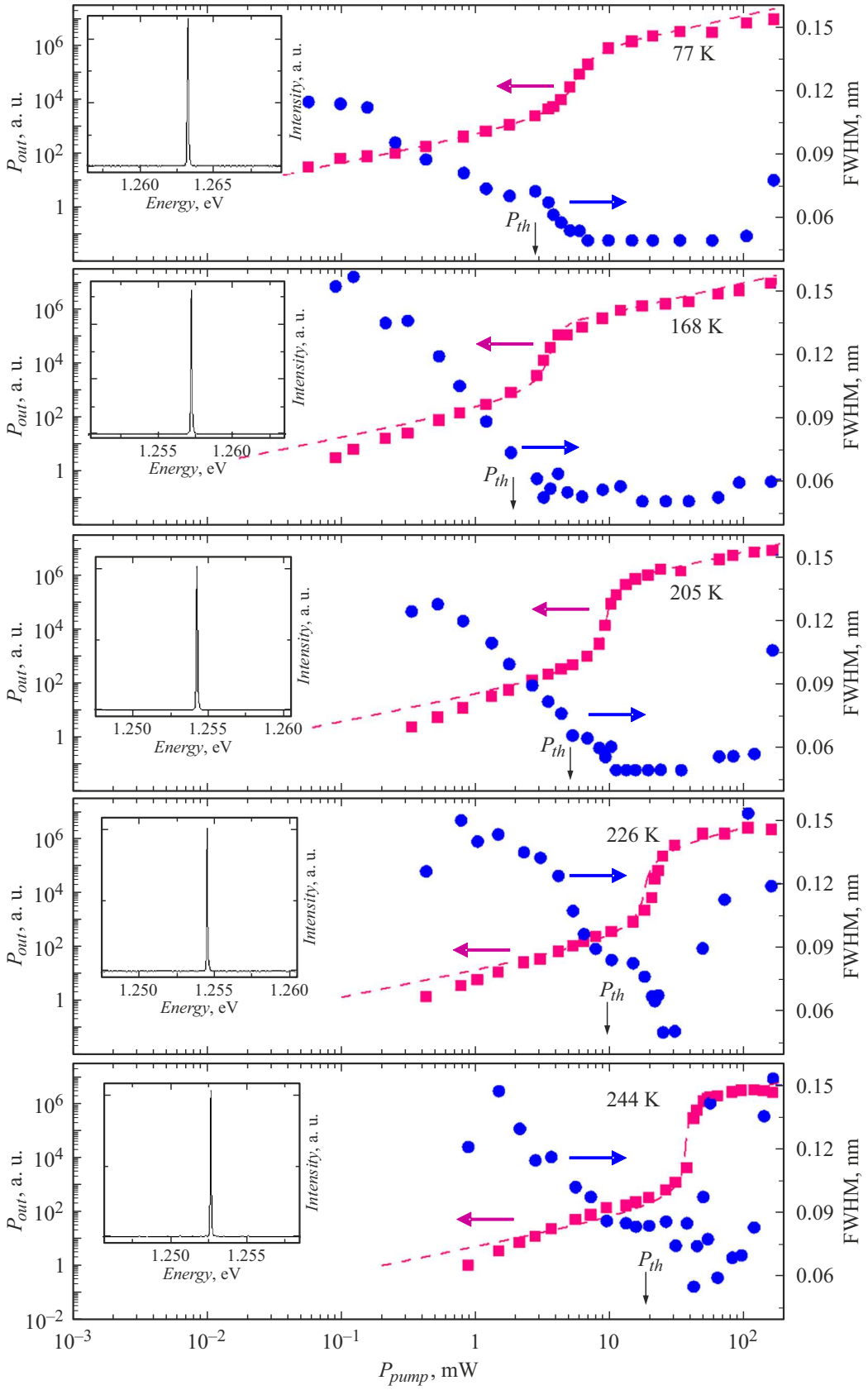

Рис. 1. Мощностная характеристика (левая ось Y) и полуширина линии генерации (правая ось Y) в зависимости от мощности накачки при различных температурах.

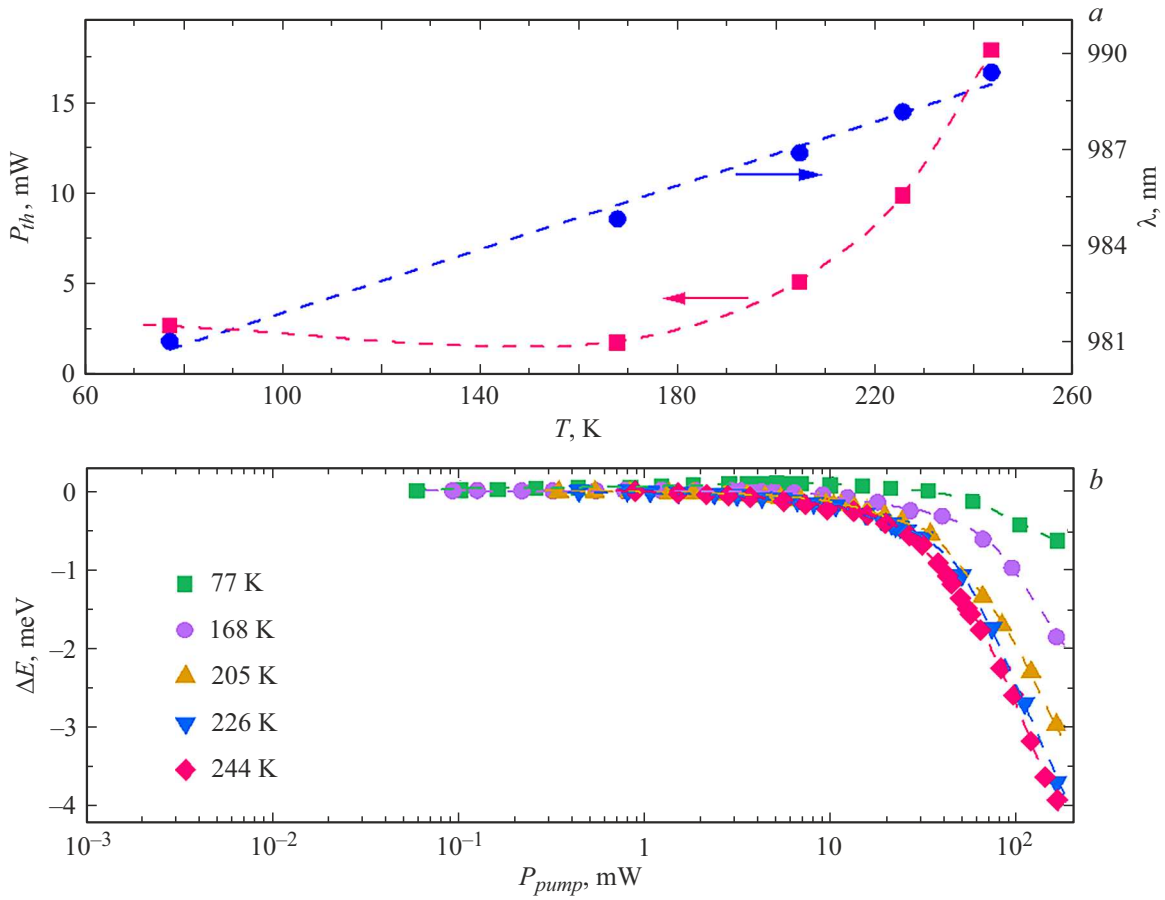

Рис. 2. *a* — пороговая мощность оптической накачки (левая ось *Y*) и длины волны генерации (правая ось *Y*) микролазера при различных температурах. *b* — сдвиг положения линии генерации в зависимости от уровня оптической накачки при температурах 77, 168, 205, 226 и 244 K.

положения линии генерации соответствует оценочному нагреву лазера ~ 10 K. Повышение температуры до 244 K приводит к сдвигу положения линии генерации (при 160 mW), который соответствует нагреву ~ 65 K.

Таким образом, в работе представлены первые результаты изучения генерации в микролазерах на основе вертикального микрорезонатора при температуре 244 K. В качестве активной области использованы три слоя квантовых точек InGaAs, сформированных методом Странского–Крастанова, с целью подавления поверхностной рекомбинации на боковой стенке микрорезонатора. Использование верхнего РБО с антиотражающим покрытием позволило реализовать высокую добротность микрорезонатора, которая вблизи порогового значения составила $\sim 12\,000$ во всем исследуемом диапазоне температур. Дальнейшие исследования будут направлены на повышение рабочих температур с целью реализации схемы РВ на основе массива спектрально-однородных микролазеров с оптической накачкой при комнатной температуре. Предполагается исследовать возможность дополнительного повышения добротности микрорезонатора (с целью снижения порога генерации), а также исключение вертикального выстраивания КТ, расположенных в различных слоях (с целью повышения материального усиления).

Финансирование работы

Работа авторов из ФТИ им. А.Ф. Иоффе выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00221-П (https://rscf.ru/project/22-19-00221/) в части разработки конструкции, эпитаксии гетероструктуры, формирования микролазеров, измерения спектров генерации. И.С. Махов, Н.В. Крыжановская благодарят за поддержку Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в части исследования спектров фотолюминесценции со скола гетероструктуры микрорезонатора (под углом 90°).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C. Mead, Proc. IEEE, **78** (10), 1629 (1990). DOI: 10.1109/5.58356

[2] 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

[3] K. Vandoorne, W. Dierckx, B. Schrauwen, D. Verstraeten, R. Baets, P. Bienstman, J. Van Campenhout, Opt. Express, **16** (15), 11182 (2008). DOI: 10.1364/oe.16.011182

[4] L. Larger, M.C. Soriano, D. Brunner, L. Appeltant, J.M. Gutierrez, L. Pesquera, C.R. Mirasso, I. Fischer, Opt. Express, **20** (3), 3241 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.003241

[5] 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

[6] M.S. Kulkarni, C. Teuscher, in *2012 IEEE/ACM Int. Symp. on nanoscale architectures (NANOARCH)* (IEEE, 2012), p. 226. DOI: 10.1145/2765491.2765531

[7] F. Duport, B. Schneider, A. Smerieri, M. Haelterman, S. Massar, Opt. Express, **20** (20), 22783 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.022783

[8] D. Brunner, I. Fischer, Opt. Lett., **40** (16), 3854 (2015). DOI: 10.1364/ol.40.003854.

[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] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, A. Blokhin, Y. Zadiranov, Y. 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

[11] 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

[12] G. Bjork, Y. Yamamoto, IEEE J. Quantum Electron., **27** (11), 2386 (1991). DOI: 10.1109/3.100877

[13] 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, I. Novikov, A. Egorov, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **31** (2), 1502808 (2025). DOI: 10.1109/jstqe.2024.3503724

[14] A.V. Babichev, E.V. Nikitina, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.Yu. Egorov, in *2024 Int. Conf. on electrical engineering and photonics (EExPolytech)* (IEEE, 2024), p. 266. DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755847