05

Микролазеры с распределенными брэгговскими отражателями $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$

© 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], А.А. Блохин[1], 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

Поступила в редакцию 18.09.2025 г.
В окончательной редакции 16.02.2026 г.
Принята к публикации 27.02.2026 г.

Представлены результаты по реализации генерации при повышенных температурах в лазерах с длиной волны генерации 980 nm на основе вертикального микрорезонатора с использованием непоглощающих на длине волны оптической накачки зеркал. Минимальная пороговая мощность накачки составила ~ 0.8 mW и соответствовала температуре 150 K. Добротность микрорезонатора, определенная на пороге генерации, превысила 13000. Максимальная рабочая температура микролазера составила 195 K. Увеличение температуры до 195 K привело к повышению пороговой мощности до 1.7 mW.

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

DOI: 10.61011/OS.2026.03.62773.8581-25

Введение

Массивы спектрально-однородных лазеров на основе вертикального микрорезонатора могут быть использованы для реализации схемы фотонных резервуарных вычислений (РВ) [1–4]. Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) [5,6] также могут обеспечить дифракционное связывание (ДС) лазеров в массиве и, как следствие, быть применены для реализации фотонных РВ [7–12], однако максимальное число лазеров в массиве, обеспечивающих ДС, не превышает 24 [11], что обусловлено значительным шагом расположения ВИЛ в массиве ($80-100\,\mu$m [1]). Использование лазеров на основе вертикального микрорезонатора с оптической накачкой позволяет создавать массивы плотно расположенных элементов с шагом расположения на порядок меньше, в сравнении с ВИЛ ($8-10\,\mu$m [1,13]). Основными недостатками реализации схемы РВ на основе лазеров с вертикальным микрорезонатором являются низкие рабочие температуры и значительные пороговые мощности накачки. Максимальная температура для микролазеров с полупроводниковыми распределенными брэгговскими отражателями (РБО) на основе чередующихся четвертьволновых слоев $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs$, при которой продемонстрирована лазерная генерация, составляет 130 K, а величина пороговой мощности накачки при данной температуре не превышает 1.2 mW [3]. Использование непоглощающих на длине волны накачки полупроводниковых зеркал (на основе $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$) позволило авторам значительно снизить порог генерации, но максимальная рабочая температура лазера составила 77 K [4], что обусловлено недостаточным усилением активных областей на основе одного слоя InGaAs КТ.

В настоящей работе представлены первые результаты по реализации генерации при повышенных температурах (до 195 K) в микролазерах с полупроводниковыми РБО на основе слоев $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$.

Детали эксперимента

Гетероструктура вертикального микрорезонатора выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs с кристаллографической ориентацией (100). В сравнении с ранее представленными результатами для конструкции микрорезонатора с непоглощающими РБО, эпитаксия которых проводилась методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений [4], увеличено число слоев квантовых точек (КТ) с целью повышения усиление активной области и реализации генерации при повышенных температурах. Ранее в гетероструктурах вертикального микрорезонатора использовались КТ, самоорганизация которых происходила из слоя $In_{0.33}Ga_{0.67}As$ [14] или $In_{0.37}Ga_{0.63}As$ [4,15]. С целью реализации нулевой величины рассогласования между положением максимума в

спектре фотолюминесценции КТ и резонансной длиной волны микрорезонатора при повышенных температурах (130 K) состав КТ был изменен. Три слоя КТ, самоорганизация которых происходила по методу Странски-Крастанова [16], формировались из слоя $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ толщиной ~ 1.9 nm. Слои КТ помещены в центр слоя GaAs, формирующего вертикальный микрорезонатор. В сравнении с результатами [3,4,15] толщина микрорезонатора (величина L_g) с длиной λ/n, где λ — длина волны, n — показатель преломления, уменьшена до 210 nm. Нижний и верхний РБО формировались на основе четвертьволновых ($\lambda/4n$) чередующихся слоев $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$. Детальное описание гетероструктуры и исследование ее структурного качества представлено в работе [17]. Микролазеры с диаметром $5\,\mu$m сформированы методом сухого травления. Для формирования профиля травления в качестве маски использован „задубленный" фоторезист. Наклон боковой стенки микролазера составил менее 1°.

Исследование спектров микрофотолюминесценции (микроФЛ) микролазеров при различных температурах проведено при расположении в оптическом криостате Cryostation s50 (Montana Instruments Corp.). Для оптической накачки использован полупроводниковый лазер с длиной волны накачки 808 nm, работающий в непрерывном режиме накачки. Фокусировка излучения лазера, используемого для накачки, в пятно диаметром $1-2\,\mu$m проведена с помощью микрообъектива M Plan Apo NIR (Mitutoyo Corp.) с 100 кратным увеличением. Для регистрации спектров люминесценции использован монохроматор Shamrock 500i (Oxford Instruments Andor Ltd), оснащенный дифракционной решеткой на основе 1200 штрихов на mm, обеспечивающей спектральное разрешение 0.05 nm.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследований проведено измерение спектров микроФЛ при различных уровнях оптической накачки в диапазоне температур 77–195 K. Показано, линия люминесценции вблизи 980 nm (см. вставки к рис. 1) демонстрирует сверхлинейный рост интегральной интенсивности излучения с увеличением уровня оптической накачки, что наряду с заужением линии люминесценции свидетельствует о наличии генерации в исследуемых микролазерах [4]. На основе распределения Гаусса [1] проведена аппроксимация формы данной линии в спектрах люминесценции, измеренных при различных уровнях оптической накачки, и температурах (рис. 1). S-образная (в двойном логарифмическом масштабе) зависимость интегральной интенсивности излучения (выходной оптической мощности, P_{out}) от мощности оптической накачки (P_{pump}) может быть аппроксимирована на основе результата решения скоростных уравнений [4,18] и описана с помощью выражения

$$P_{\text{pump}} = \kappa\gamma q\Big(bP_{\text{out}}(1+\xi)(1+\beta bP_{\text{out}})\big/ (1+bP_{\text{out}}) - \xi\beta bP_{\text{out}}\Big)\Big/\delta\beta, \qquad (1)$$

где κ — коэффициент, характеризующий эффективность оптической накачки КТ и учитывающий поглощение излучения в слоях верхнего РБО и микрорезонатора, q — заряд электрона, b — коэффициент, связывающий среднее число фотонов в оптической моде и выходную оптическую мощность, ξ — параметр, характеризующий число фотонов в лазерной моде при достижении порога прозрачности, δ — эффективность преобразования поглощенной мощности в число экситонов, γ — обратное время жизни фотонов в микрорезонаторе и β — фактор, определяющий долю спонтанного излучения в лазерной моде. Величина $\kappa(\lambda)$ может быть определена с учетом выражения [3]

$$\kappa(\lambda) = T_{\text{DBR}}(\lambda)\Big[\big(1-\exp(-\alpha_{\text{GaAs}}(\lambda,T)L_g)\big) + \big(1-\exp(-\alpha_{\text{WL}}(\lambda,T)L_{\text{WL}})\big)\Big], \qquad (2)$$

где $T_{\text{DBR}}(\lambda)$ — коэффициент пропускания верхнего РБО на заданной длине волны, $\alpha_{\text{GaAs}}(\lambda,T)$ — коэффициент поглощения GaAs на заданной длине волны и при фиксированной температуре T, $\alpha_{\text{WL}}(\lambda,T)$ — коэффициент поглощения смачивающего слоя ($In_{0.5}Ga_{0.5}As$) на заданной длине волны при фиксированной температуре T. Величина $T_{\text{DBR}}(\lambda)$ описывается с помощью выражения [3]

$$T_{\text{DBR}}(\lambda) = \big(1-R_{\text{DBR}}(\lambda)\big)\exp\big(-\alpha_{\text{AlGaAs}}(\lambda,T)L_{\text{DBR}}\big), \quad (3)$$

где R_{DBR} — коэффициент отражения верхнего РБО на заданной длине волны, α_{AlGaAs} — коэффициент поглощения слоев AlGaAs, формирующих верхний РБО, и L_{DBR} — суммарная толщина данных слоев верхнего РБО. С учетом данных по поглощению (Al)GaAs и InGaAs, представленных в работах [3,19–22], и расчетных спектров отражения верхнего РБО (расчет методом матриц переноса при различных температурах) проведена оценка коэффициента κ, характеризующего эффективность накачки активной области, которая составила 13.5 % при 77 K. Увеличение температуры до 195 K привело к росту эффективности накачки до 15.0 %. Величина γ описывается на основе выражения [3]

$$\gamma = 2\pi E/hQ, \qquad (4)$$

где E — энергия кванта, Q — добротность микрорезонатора, h — постоянная Планка, выраженная в eV·s. Величина δ определяется на основе анализа допороговых мощностных характеристик [3]. С учетом данных значений построены зависимости $P_{\text{out}}(P_{\text{pump}})$, представленные на рис. 1.

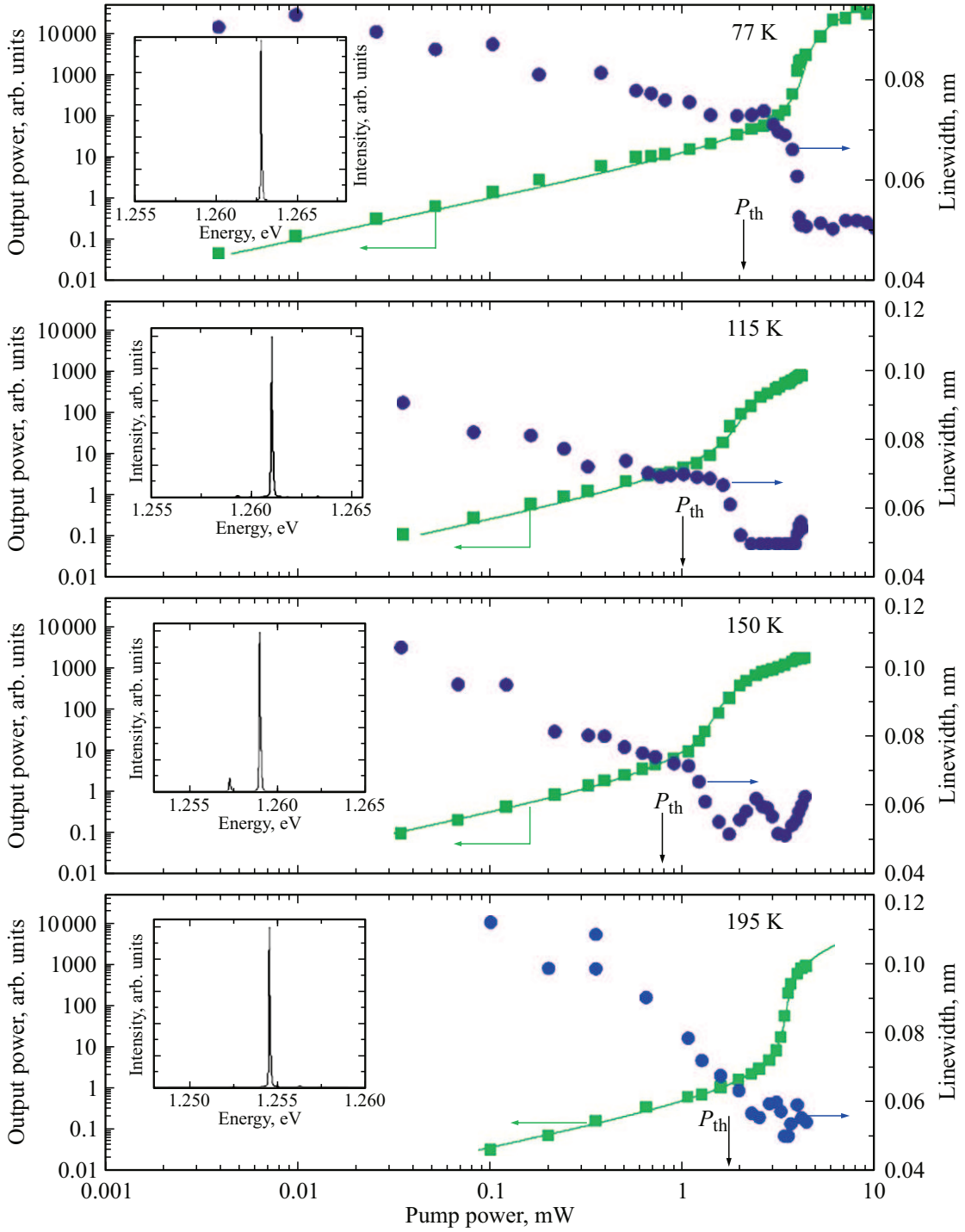


Рис. 1. Зависимости интегральной интенсивности излучения (левая ось Y) и полуширины линии генерации 980 nm (правая ось Y) от мощности накачки. Панели (сверху вниз) — при температурах 77, 115, 150 и 195 K. Вставки соответствуют спектрам генерации при фиксированной мощности оптической накачки 4.3 mW.

Пороговое значение мощности накачки P_{th} может быть определено при условии, что среднее число фотонов на пороге генерации равно единице ($bP_{\text{out}} = 1$) и описывается на основе выражения [18]

$$P_{\text{th}} = \kappa\gamma q[1 + \beta + \xi(1 - \beta)]/2\delta\beta. \qquad (5)$$

Зависимость $P_{\text{th}}(T)$ приведена на рис. 2, верхняя панель. Показано, что минимум температурной зависимости порога генерации соотносится с температурой, соответствующей нулевому рассогласованию между положением максимума спектра фотолюминесценции КТ и резонансной длиной волны микрорезонатора. Наи-

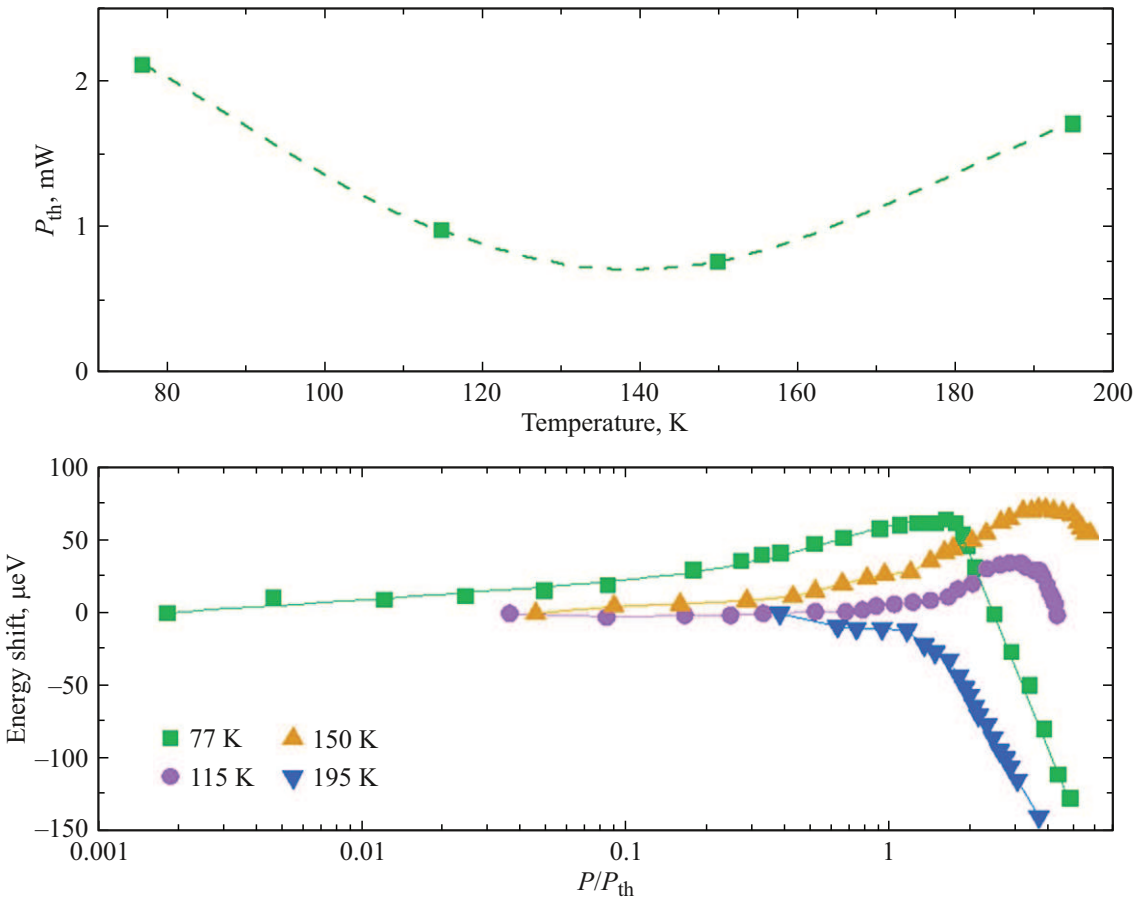


Рис. 2. Верхняя панель — зависимость пороговой мощности оптической накачки от температуры микролазера. Нижняя панель — зависимости сдвига положения линии генерации (энергии кванта) от уровня оптической накачки, соответствующие температуре 77, 115, 150 и 195 K.

меньшее экспериментальное значение пороговой мощности накачки составляет $\sim 760\,\mu$W и соответствует температуре 150 K. Пороговая поглощенная мощность, определяемая как произведение $\kappa(\lambda)$ и P_{th}, приведенная к слою КТ, составила $\sim 40\,\mu$W, что соотносится с ранее представленными результатами при более низкой температуре ($P_{th} \sim 40\,\mu$W для $5.4\,\mu$m микролазера при 77 K [4]). Максимальная величина β-фактора соответствовала температуре минимума порога накачки (150 K) и равнялась $0.7 \pm 0.2\,\%$. Данное значение сопоставимо с ранее обсуждаемыми для высокодобротных микрорезонаторов ($\beta = 1.0 \pm 0.3\,\%$ для $5.4\,\mu$m микролазера при 77 K [4]). Величина добротности микрорезонатора, определенная на пороге генерации (Q_{thr}), составила 13300. Большие значения Q_{thr} (15000 для $5.4\,\mu$m микролазера [4]) обсуждались ранее, однако данные результаты соответствуют температуре 77 K и, как следствие, меньшему разогреву лазера.

Максимальная температура, при которой наблюдался переход к лазерной генерации, подтвержденный S-образной мощностной характеристикой, составила 195 K. Значение пороговой мощности при данной температуре (~ 1.7 mW) меньше аналогичной величины (2.6 mW) для планарных микролазеров с генерацией на дефектной моде [14]. Для микролазеров с РБО на основе $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, эпитаксия которых проводилась методом газофазной эпитаксии, максимальная температура, при которой наблюдалась генерация, составила 200 K, а порог генерации составил 1.9 mW [23].

Ранее было показано [4,14,24], что применение РБО на основе $GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, поглощающих на длине волны накачки (в слоях GaAs, формирующих РБО), приводит к дополнительному разогреву микролазера, что выражается в длинноволновом сдвиге длины волны генерации с ростом уровня накачки и уширении линии генерации [4]. В свою очередь использование непоглощающих на длине волны накачки зеркал (переход к использованию $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ взамен GaAs) позволяет минимизировать тепловые эффекты. Как результат, уширения линии генерации и существенного сдвига ее длины волны не продемонстрировано как для случая генерации на вертикальной моде [4,14], так и на моде шепчущей галереи [15,25]. В исследованных микролазерах также не наблюдается существенного уширения линии генерации с ростом уровня накачки (рис. 1). Положение линии генерации в спектрах люминесценции

микролазера, измеренных при различных температурах, представлено на рис. 2, нижняя панель. При температуре 77 K в допороговом режиме наблюдается сдвиг линии ФЛ в коротковолновую область спектра ($\sim 60\,\mu$eV) с последующим превалированием тепловых эффектов вследствие высоких пороговых значений мощности накачки при данной температуре, что дает длинноволновый сдвиг положения линии на $16\,\mu$eV (до $+44\,\mu$eV) при двухкратном превышении пороговой мощности накачки. Повышение температуры до 115 K приводит к более выраженному коротковолновому сдвигу линии генерации ($35\,\mu$eV), что соответствует трехкратному превышению порога накачки с последующим превалированием тепловых эффектов. При температуре, соответствующей минимуму пороговой мощности накачки (150 K), коротковолновый сдвиг положения линии генерации составляет $70\,\mu$eV, что обусловлено превалированием плазменных эффектов [4], вызванных увеличением числа инжектируемых носителей над тепловыми эффектами вследствие разогрева образца. Увеличение температуры до 195 K приводит к длинноволновому сдвигу линии генерации в допороговом режиме, что свидетельствует о превалировании разогрева образца во всем диапазоне уровней накачки.

Заключение

В работе представлены результаты по реализации генерации при повышенных температурах в микролазерах с полупроводниковыми РБО. Использование непоглощающих на длине волны накачки зеркал позволило повысить эффективность оптической накачки в 5 раз, которая составила 15 % при 195 K. Минимальная пороговая мощность накачки ($\sim 40\,\mu$W при 150 K) соответствует температуре нулевого рассогласования между положением люминесценции КТ и резонансной длины волны микрорезонатора и соотносится с ранее представленными результатами, полученными при более низких температурах ($P_{\text{th}} \sim 40\,\mu$W при 77 K [4]). Максимальная оценочная величина β-фактора составила 0.7 ± 0.2 %. Использование непоглощающих на длине волны накачки зеркал позволило повысить температурную стабильность лазера и реализовать генерацию в микролазерах с вертикальным микрорезонатором при 195 K с пороговой мощностью накачки менее 2 mW. Аналогичные выходные характеристики продемонстрированы для микролазеров, выращенных методом газофазной эпитаксии [23]. Данные результаты открывают возможность реализации схемы резервуарных вычислений на основе микролазеров с оптической накачкой при температуре, более чем в 2 раза превышающей ранее обсуждаемую [1].

Финансирование работы

Работа А.В. Бабичева, Я.Н. Ковача, А.А. Блохина, А.П. Васильева и С.А. Блохина выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-19-00221-П, https://rscf.ru/project/22-19-00221/ в части эпитаксии гетероструктуры, формирования микролазеров, измерения спектров генерации. И.С. Махов, Н.В. Крыжановская благодарят за финансовую 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] T. Heuser, J. Grose, S. Holzinger, M.M. Sommer, S. Reitzenstein. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **26** (1), 1 (2020). DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2925968
[2] T. Heuser, J. Große, A. Kaganskiy, D. Brunner, S. Reitzenstein. APL Photonics, **3** (11), 116103 (2018). DOI: 10.1063/1.5050669
[3] 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
[4] 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
[5] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, V.M. Ustinov, V.E. Bougrov, A.Y. Egorov, L.Y. Karachinsky. Opt. Eng., **61** (9), 096109 (2022). DOI: 10.1117/1.OE.61.9.096109
[6] 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
[7] A. Skalli, J. Robertson, D. Owen-Newns, M. Hejda, X. Porte, S. Reitzenstein, A. Hurtado, D. Brunner. Opt. Mater. Express, **12** (6), 2395 (2022). DOI: 10.1364/OME.450926
[8] 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**, 723 (2023). DOI: 10.1038/s41566-023-01233-w
[9] T. Heuser, M. Pflüger, I. Fischer, J.A. Lott, D. Brunner, S. Reitzenstein. J. Phys. Photonics, **2** (4), 044002 (2020). DOI: 10.1088/2515-7647/aba671
[10] A. Skalli, X. Porte, N. Haghighi, S. Reitzenstein, J.A. Lott, D. Brunner. Opt. Mater. Express, **12** (7), 2793 (2022). DOI: 10.1364/OME.451524
[11] M. Pflüger, D. Brunner, T. Heuser, J.A. Lott, S. Reitzenstein, I. Fischer. Opt. Lett., **49** (9), 2285 (2024). DOI: 10.1364/ol.518946
[12] A. Skalli, M. Goldmann, N. Haghighi, S. Reitzenstein, J.A. Lott, D. Brunner. Commun. Phys., **8** (1), 68 (2025). DOI: 10.1038/s42005-025-01972-y
[13] 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 (2024). DOI: 10.1109/JSTQE.2024.3494245
[14] K. Gaur, C.-W. Shih, I. Limame, A. Koulas-Simos, N. Heermeier, C.C. Palekar, S. Tripathi, S. Rodt, S. Reitzenstein. Appl. Phys. Lett., **124** (4), 041104 (2024). DOI: 10.1063/5.0177393
[15] 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
[16] А.В. Бабичев, С.Д. Комаров, Ю.С. Ткач, В.Н. Неведомский, С.А. Блохин, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков. ФТП, **57** (1), 63 (2023). DOI: 10.21883/ftp.2023.01.54932.4184 [A.V. Babichev, S.D. Komarov, Y.S. Tkach, V.N. Nevedomskiy, S.A. Blokhin, N.V. Kryzhanovskaya, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov. Semiconductors, **57**, 93 (2023). DOI: 10.1134/S1063782623040012].
[17] А.В. Бабичев, А.М. Надточий, С.А. Блохин, В.Н. Неведомский, Н.В. Крыжановская, М.А. Бобров, А.П. Васильев, Н.А. Малеев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.Ю. Егоров. ФТП, **58** (6), 318 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.06.58946.6287
[18] G. Bjork, Y. Yamamoto. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **27** (11), 2386 (1991). DOI: 10.1109/3.100877
[19] B. Monemar, K.K. Shih, G.D. Pettit. J. Appl. Phys., **47** (6), 2604 (1976). DOI: 10.1063/1.322979
[20] D.E. Aspnes, S.M. Kelso, R.A. Logan, R.J. Bhat. Appl. Phys., **60** (2), 754 (1986). DOI: 10.1063/1.337426
[21] M. Sturge. Phys. Rev., **127** (3), 768 (1962). DOI: 10.1103/physrev.127.768
[22] S. Adachi. *Physical properties of III-V semiconductor compounds* (John Wiley & Sons., Hoboken, N.J., U.S., 1992). DOI: 10.1002/352760281x
[23] K. Gaur, S. Tripathi, F. Laudani, A. Barua, I. Limame, A. Koulas-Simos, S. Rodt, S. Reitzenstein. Laser Photonics Rev., **19** (18), e00533 (2025), DOI: 10.1002/lpor.202500533
[24] N. Heermeier, T. Heuser, J. Große, N. Jung, A. Kaganskiy, M. Lindemann, N.C. Gerhardt, M.R. Hofmann, S. Reitzenstein. Laser Photonics Rev., **16** (4), 2100585 (2022). DOI: 10.1002/lpor.202100585
[25] 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 (2024). DOI: 10.1109/JSTQE.2024.3503724