

08

Направленность вывода излучения из кольцевых микролазеров с нарушенной вращательной симметрией

© Д.А. Масютин¹, Э.И. Моисеев¹, С.Д. Комаров¹, С.А. Минтаиров^{2,3}, Н.А. Калюжный^{2,3}, Ю.А. Салий², М.М. Кулагина², Ф.И. Зубов³, Р.А. Хабибуллин⁴, Р.Р. Галиев⁴, А.Ю. Павлов⁴, К.Н. Томош⁴, Н.В. Крыжановская¹, А.Е. Жуков¹

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

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

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

E-mail: dmasyutin@hse.ru

Поступило в Редакцию 28 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 4 декабря 2025 г.

Исследованы инжекционные полупроводниковые микролазеры с кольцевым резонатором радиусом $15\text{ }\mu\text{m}$ с несимметричным расположением внутреннего отверстия резонатора. Показано, что асимметрия обеспечивает формирование в диаграмме направленности двух лепестков излучения, разориентированных на 50° относительно оси смещения внутреннего отверстия. Измеренная добротность резонаторов сопоставима с добротностью дисковых резонаторов и находится на уровне $\sim 10^6$.

Ключевые слова: микролазеры, кольцевой резонатор, квантовые точки InGaAs/GaAs, направленное излучение, добротность.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62518.20584

Полупроводниковые дисковые микролазеры, поддерживающие оптические моды шепчущей галереи (МШГ), позволяют достичь высокой добротности при размерах в единицы-десятки микрометров и рассматриваются как потенциальные компоненты квантовой оптической связи [1], фотонных интегральных схем [2], высокочувствительных датчиков [3], оптических гироскопов [4]. Однако вращательная симметрия диска приводит к изотропному излучению в свободное пространство, в то время как многие приложения (например, источники одиночных фотонов, фотонные интегральные схемы) требуют направленного вывода излучения. Были предложены различные подходы для его достижения в дисковых лазерах: точечный рассеиватель [5], линейный дефект [6], оптические наноантенны [7]. Альтернативным подходом было использование резонаторов асимметричной формы, таких как спираль [8], закругленный треугольник [9], микростадион [10], улитка Паскаля [11]. Методы [5–7] не предполагают групповую технологию изготовления. Для методов [8–10] характерны низкая добротность (Q) и, как правило, высокий порог генерации вследствие деформации резонатора. Для метода [11] получен направленный вывод излучения с сохранением высокой добротности, однако для геометрии улитки Паскаля, как и для дисков, характерно наличие внутренней области в резонаторе, не вносящей вклад в лазерную генерацию на МШГ [12]. В [13,14] была предложена схема создания асимметрии в микрорезонаторах за счет использования кольцевой геометрии с несимметричным расположением

внутреннего отверстия, обеспечивающая формирование высокодобротных мод и направленного излучения. В настоящей работе экспериментально исследованы высокодобротные инжекционные микролазеры с асимметричной геометрией резонатора и квантовыми точками $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ в активной области, работающими в непрерывном режиме.

Эпитаксиальная структура синтезирована методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке n^+ -GaAs, разориентированной на 6° от плоскости (100). Активная среда представляла собой пять слоев квантовых точек $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$, помещенных в волноводный слой GaAs общей толщиной $0.79\text{ }\mu\text{m}$. Эмиттерные слои $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$ толщиной $1.5\text{ }\mu\text{m}$ были легированы кремнием (n -слой) и цинком (p -слой). Контактный слой p^+ -GaAs легирован до уровня 10^{19} cm^{-3} . Микрорезонаторы диаметром $30\text{ }\mu\text{m}$ были сформированы с помощью электронной литографии и плазмохимического травления глубоких мез цилиндрической формы. Внутри цилиндра было сделано отверстие диаметром $d = 10\text{ }\mu\text{m}$, расстояние от края резонатора до отверстия было равно $5\text{ }\mu\text{m}$ (см. вставку на рис. 1, а). Также для сравнения были изготовлены микродисковые лазеры без внутреннего отверстия. Глубина травления мез составила $4\text{ }\mu\text{m}$. Верхние омические контакты к p^+ -GaAs были сформированы с помощью металлизации AgMn/Ni/Au и имели кольцевую форму. Нижний сплошной контакт к n^+ -подложке был сформирован с помощью металлиза-

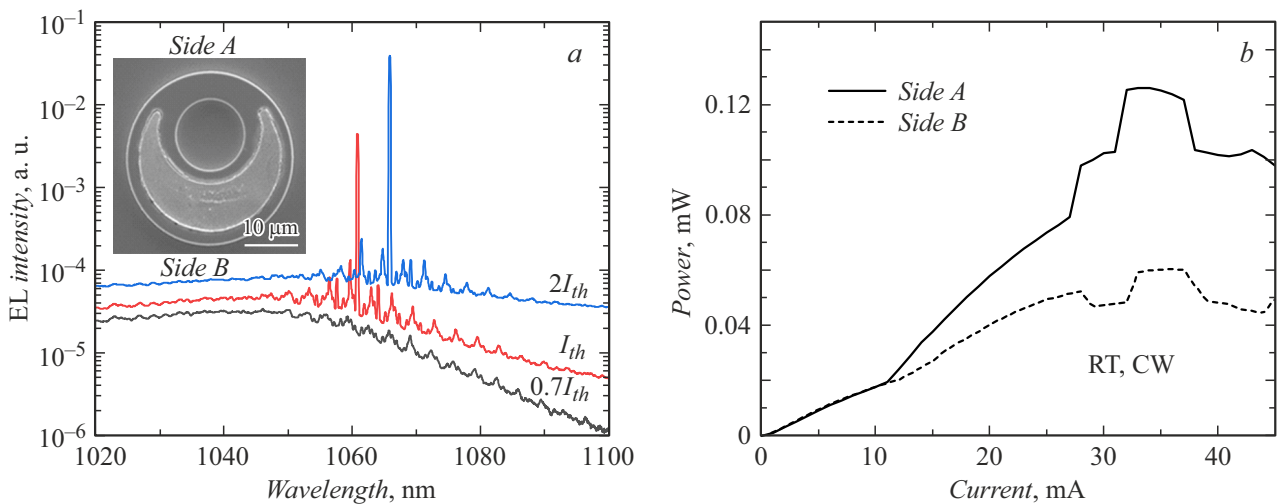


Рис. 1. *a* — спектры электролюминесценции микрокольца с отверстием, полученные при различных токах накачки; *b* — ватт-амперная зависимость, измеренная со стороны отверстия (сплошная линия) и с противоположной стороны (штриховая линия). На вставке — изображение кольцевого микролазера, полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

ции AuGe/Ni/Au. Далее GaAs-подложка с микролазерами была разделена на отдельные чипы.

Чипы с одиночными микролазерами паивались *n*-контактом на медный теплоотвод и тестировались в непрерывном режиме. Для электрической накачки использовался источник питания Keithley 2401. Для электрических соединений применялись игольчатые зонды. Для сбора излучения микролазера использовался микрообъектив Mitutoyo Plan Apo NIR 20X. Спектры электролюминесценции регистрировались анализатором оптического спектра Yokogawa AQ6370C. Спектральная ширина линии измерялась с помощью установки на основе интерферометра Фабри–Перо Thorlabs SA210-8B со спектральным разрешением 67 МГц. Абсолютное значение оптической мощности оценивалось с помощью фотодиода Thorlabs S132C, расположенного на расстоянии 4 мм от тестируемого микролазера. Распределение оптической мощности по азимутальному углу измерялось путем вращения образца вокруг оси и регистрации оптической мощности фотодиодом, при этом угловое разрешение задавалось диафрагмой, ограничивающей апертуру фотодиода, и составляло $\sim 0.3^\circ$.

На рис. 1, *a* приведены спектры электролюминесценции микролазера с отверстием. Спектральное положение линии генерации находится вблизи максимума электролюминесценции спонтанного излучения квантовых точек $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ и составляет 1060 нм. Пороговый ток лазерной генерации определялся по перегибу на ватт-амперной зависимости (рис. 1, *b*) и составил $I_{th} = 11$ мА. С увеличением тока накачки наблюдается длинноволновое смещение лазерной линии, вызванное саморазогревом лазера. Из-за увеличения температуры активной среды и уменьшения ширины запрещенной зоны слоев $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ при повышении тока накачки происходит наблюдаемое на рис. 1, *a* увеличение ин-

тенсивности электролюминесценции спонтанного излучения в области длин волн 1080–1100 нм. Рост оптической мощности наблюдается до тока инжекции 35 мА и далее ограничен саморазогревом лазера. Максимальное значение оптической мощности со стороны отверстия в 2.5 раза больше (рис. 1, *b*), чем с противоположной стороны.

Далее было выполнено более подробное исследование распределения мощности по азимутальному углу расположения детектора (β) относительно оси смещения внутреннего отверстия для дискового лазера с вращательной симметрией (μ -disk) и асимметричного кольцевого микролазера (μ -ring) (рис. 2, *a*). Видно, что излучение кольца содержит два интенсивных лепестка при $\pm 50^\circ$, в то время как диаграмма направленности диска не имеет выделенных направлений излучения, его локальные максимумы излучения связаны с рассеянием на шероховатостях боковой поверхности. Провал интенсивности лазеров, наблюдаемый вблизи -90° , образован тенью игольчатого зонда, используемого для подключения лазера к источнику питания.

На экспериментальной зависимости ширины линии генерации для асимметричного кольцевого микролазера от тока накачки можно выделить два участка (рис. 2, *b*): на первом участке ширина линии излучения резко уменьшается с ростом тока накачки вследствие перехода в режим лазерной генерации, на втором наблюдается медленный рост, обусловленный различными факторами, в том числе разогревом, увеличением плотности носителей и фотонов в микрорезонаторе и т.п. [15]. Для сравнения приведена зависимость спектральной ширины лазерной линии от тока накачки для дискового микролазера. Вблизи порога как для симметричной, так и для асимметричной формы резонатора ширина лазерной линии составляет около 170–200 МГц, что

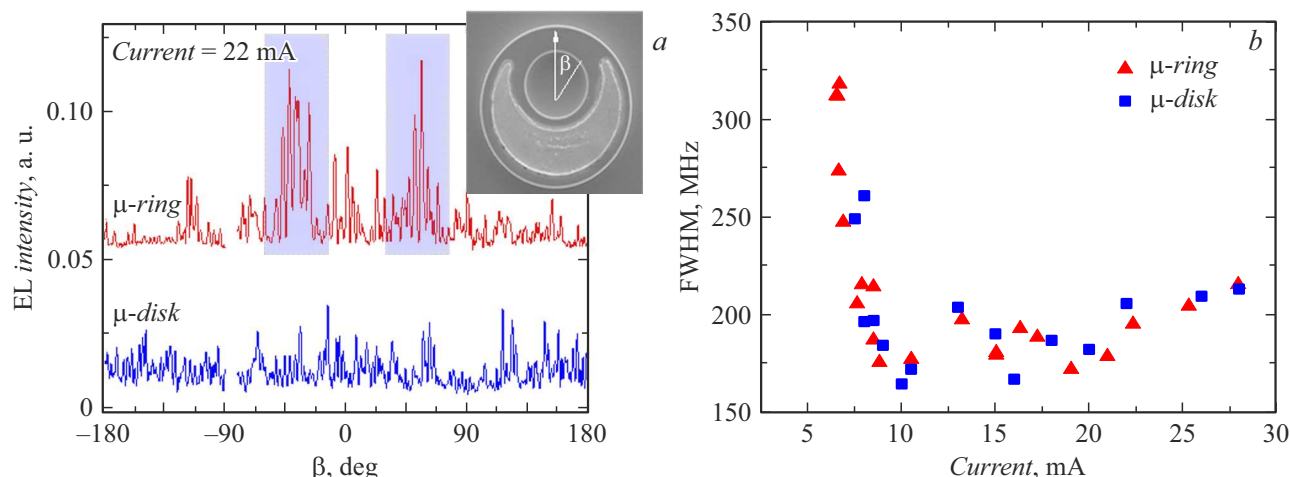


Рис. 2. *a* — азимутальный профиль дальнего поля для дискового (нижняя кривая) и кольцевого (верхняя кривая) микролазеров (сдвинуты по вертикальной оси для удобства восприятия); *b* — зависимость ширины лазерной линии от тока.

близко к значениям, полученным в других работах с использованием спектроскопии высокого разрешения для дисковых микролазеров такого же диаметра [16]. Добротность кольцевого резонатора с направленным выводом, оцененная как отношение длины волны к ее ширине, составила $\sim 10^6$. Полученный результат показывает, что формирование смещенного отверстия данной геометрии в микрорезонаторе не приводит к уширению лазерной линии и уменьшению добротности.

Таким образом, в работе исследованы микролазеры с активной областью на основе квантовых точек InGaAs/GaAs с кольцевым резонатором, содержащим смещенное относительно центра отверстие. Показано, что введение асимметрии в геометрию резонатора позволяет сформировать направленное излучение со стороны отверстия. Диаграмма направленности содержит два интенсивных лепестка примерно при $\pm 50^\circ$, порог генерации и добротность не ухудшаются по сравнению с таковыми для дисковых микролазеров без асимметрии формы резонатора, при этом добротность составляет не менее 10^6 . Полученные результаты демонстрируют возможность реализации компактных микролазеров с контролируемым направлением излучения без снижения добротности, что показывает потенциал их использования в качестве активных компонентов фотонных интегральных схем.

Благодарности

Исследования выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки „Комплексный оптоэлектронный стенд“.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-20048 (<https://rscf.ru/project/25-72-20048/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.R. Gizatulin, A. Sultanov, Proc. SPIE, **10774**, 107741S (2018). DOI: 10.1117/12.2317739
- [2] F. Tabataba-Vakili, C. Brimont, B. Alloing, B. Damilano, L. Doyennette, T. Guillet, M. El Kurdi, S. Chenot, V. Brändli, E. Frayssinet, J.-Y. Duboz, F. Semond, B. Gayral, P. Boucaud, Appl. Phys. Lett., **117**, 121103 (2020). DOI: 10.1063/5.0015252
- [3] L. He, Ş.K. Özdemir, J. Zhu, W. Kim, L. Yang, Nat. Nanotechnol., **6**, 428 (2011). DOI: 10.1038/nnano.2011.99
- [4] Y.-H. Lai, M.-G. Suh, Y.-K. Lu, B. Shen, Q.-F. Yang, H. Wang, J. Li, S.H. Lee, K.Y. Yang, K. Vahala, Nat. Photon., **14**, 345 (2020). DOI: 10.1038/s41566-020-0588-y
- [5] C.P. Dettmann, G.V. Morozov, M. Sieber, H. Waalkens, Phys. Rev. A, **80**, 063813 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevA.80.063813
- [6] A. Tulek, Z.V. Vardeny, Appl. Phys. Lett., **90**, 161106 (2007). DOI: 10.1063/1.2723078
- [7] Y.S. Polubavkina, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, M.M. Kulagina, I.S. Mukhin, F.E. Komissarenko, Y.M. Zadiranov, M.V. Maximov, A.E. Krasnok, A.A. Bogdanov, A.E. Zhukov, A.V. Shelaev, J. Phys.: Conf. Ser., **741**, 012158 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/741/1/012158
- [8] G.D. Chern, H.E. Tureci, A.D. Stone, R.K. Chang, M. Kneissl, N.M. Johnson, Appl. Phys. Lett., **83**, 1710 (2003). DOI: 10.1063/1.1605792
- [9] M.S. Kurdoglyan, S.-Y. Lee, S. Rim, C.-M. Kim, Opt. Lett., **29**, 2758 (2004). DOI: 10.1364/OL.29.002758
- [10] D.-P. Cai, J.-H. Lu, C.-C. Chen, C.-C. Lee, C.-E. Lin, T.-J. Yen, Sci. Rep., **5**, 10078 (2015). DOI: 10.1038/srep10078
- [11] E. Moiseev, K. Ivanov, R. Khabibullin, R. Galiev, A. Pavlov, K. Tomosh, M. Maximov, F. Zubov, I. Makhov, A. Nahorny, M. Kulagina, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov, Opt. Laser Technol., **183**, 112299 (2025). DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.112299

- [12] Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков, А.М. Надточий, И.А. Словинский, М.В. Максимов, М.М. Кулагина, А.В. Савельев, Е.М. Аракчеева, Ю.М. Задиранов, С.И. Трошков, А.А. Липовский, ФТП, **46** (8), 1063 (2012). [N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, A.M. Nadtochy, I.A. Slovinsky, M.V. Maximov, M.M. Kulagina, A.V. Savelev, E.M. Arakcheeva, Yu.M. Zadiranov, S.I. Troshkov, A.A. Lipovskii, Semiconductors, **46** (8), 1040 (2012). DOI: 10.1134/S106378261208012X].
- [13] S. Zhang, Y. Li, P. Hu, A. Li, Y. Zhang, W. Du, M. Du, Q. Li, F. Yun, Opt. Express, **28**, 6443 (2020). DOI: 10.1364/OE.386453
- [14] I.V. Ketov, A.O. Spiridonov, A.I. Repina, E.M. Karchevskii, Prog. Syst.: Theory Appl., **13**, 139 (2022). DOI: 10.25209/2079-3316-2022-13-3-139-163
- [15] H. Halbritter, R. Shau, F. Riemenschneider, B. Kögel, M. Ortsiefer, J. Roskopf, G. Böhm, M. Maute, M.-C. Amann, P. Meissner, Electron. Lett., **40**, 1266 (2004). DOI: 10.1049/el:20046457
- [16] N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, F.I. Zubov, A.M. Mozharov, M.V. Maximov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.M. Kulagina, S.A. Blokhin, K.E. Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, S.V. Morozov, Yu. Berdnikov, S. Rouvimov, A.E. Zhukov, Photon. Res., **7**, 664 (2019). DOI: 10.1364/PRJ.7.000664