

07

Бимодальная генерация на модах шепчущей галереи в лазерах на основе вертикального микрорезонатора

© А.В. Бабичев¹, И.С. Махов², Н.В. Крыжановская², Ю.М. Задиранов¹, Ю.А. Салий¹, М.М. Кулагина¹, Я.Н. Ковач^{1,3}, М.А. Бобров¹, А.П. Васильев¹, С.А. Блохин¹, Н.А. Малеев¹, Л.Я. Карачинский³, И.И. Новиков³, А.Ю. Егоров³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 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 23 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 28 октября 2024 г.

Принято к публикации 5 ноября 2024 г.

Представлены результаты исследования расщепления мод шепчущей галереи в лазерах спектрального диапазона 930–950 nm на основе вертикального микрорезонатора. Использование распределенных брэгговских отражателей на основе чередующихся слоев $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, не поглощающих на длине волны накачного лазера, позволило снизить величину пороговой мощности оптической накачки до $180 \mu\text{W}$ (для $3 \mu\text{m}$ -микролазера). Добротность микрорезонатора на пороге генерации для мод шепчущей галереи превысила 14 000. Значительное энергетическое расстояние между модами ($\sim 80 \mu\text{eV}$) наряду с высокой стабильностью длины волны генерации с ростом уровня накачки ($\sim 220 \mu\text{eV}$) свидетельствует о перспективе использования данных лазеров с целью модуляции поляризации излучения.

Ключевые слова: квантовые точки, молекулярно-пучковая эпитаксия, механизм Странски–Крастанова, арсенид галлия, расщепление мод, бимодальность.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.05.59903.20129

Ключевым элементом высокоскоростных оптических соединений являются вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ). Предельная частота малосигнальной модуляции амплитуды сигнала в ВИЛ составляет 40 GHz [1].

Концепция, основанная на создании бимодальных лазеров [2–5], позволяет повысить частоту малосигнальной модуляции спиновых ВИЛ до 200 GHz за счет модуляции поляризации излучения [2].

Основными преимуществами микролазеров с оптической накачкой на основе вертикальных микрорезонаторов по сравнению с ВИЛ являются существенное снижение пороговых мощностей накачки и возможность создания более плотных массивов лазеров. Первые результаты по реализации модуляции поляризации излучения в бимодальных микролазерах представлены в работе [6]. Авторам удалось реализовать частоту малосигнальной модуляции поляризации излучения ~ 10 GHz в микролазерах с пороговой мощностью накачки 2.1 mW [6], где в силу эллиптичности микрорезонатора в поперечном сечении [7,8] величина расщепления мод составила $\sim 41 \mu\text{eV}$.

В настоящей работе представлены первые результаты по реализации бимодальной генерации на модах шепчущей галереи (МШГ) в лазерах с вертикальным микрорезонатором.

Гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs с кристаллографической ориентацией $(100) \pm 0.5^\circ$. Нижний и верхний распределенные брэгговские от-

ражатели включали 35 и 27 пар чередующихся четвертьволновых слоев $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Вертикальный микрорезонатор был сформирован на основе GaAs толщиной 210 nm, в центр которого помещены три слоя квантовых точек (КТ) InGaAs, разделенных слоями GaAs толщиной 20 nm. Самоорганизация КТ произошла по механизму Странски–Крастанова из слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ толщиной 5.5 монослоев.

Травление гетероструктуры проводилось методом сухого ионного травления через маску на основе фоторезиста. Диаметры микролазера, измеренные в ортогональных направлениях, составили 3.13 и $3.15 \mu\text{m}$, что соответствует эллиптичности ϵ [6], равной 0.4%.

Оптические измерения проводились в криостате замкнутого цикла Montana Instruments Cryostation s50. Накачка микролазера осуществлялась через верхний распределенный брэгговский отражатель полупроводниковым лазером с длиной волны генерации 808 nm в непрерывном режиме. Фокусировка излучения накачного лазера осуществлялась с помощью микрообъектива с 50-кратным увеличением Mitutoyo MPlan Apo NIR. Размер пятна накачки соответствовал диаметру микролазера. Для регистрации излучения использовался монохроматор Andor Shamrock 500i с охлаждаемой кремниевой CCD-матрицей DU 401A BVF. Использование дифракционной решетки с числом штрихов 1200 на 1 mm обеспечило спектральное разрешение 0.05 nm. Измерение спектров микрофотолюминесценции проведено при 77 K.

С увеличением мощности оптической накачки наблюдается сверхлинейный рост интегральной интенсивности для двух линий люминесценции (на длинах волн 930 и 951 nm), что наряду с заужением полуширины линий свидетельствует о переходе к лазерной генерации [9]. Межмодовое расстояние (FSR), равное ~ 30 meV, соответствует случаю генерации на МШГ и описывается с помощью выражения [10–12]: $FSR = hc/\pi D n_{eff}$, где h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, D — диаметр микролазера, n_{eff} — эффективный показатель преломления. Величина n_{eff} оценена с помощью выражения [10,12]: $n_{eff} = 3.693 - 1.052E + 0.610E^2$, где E — энергия кванта для ТЕ-мод, наблюдаемых при МШГ-генерации в микролазерах на КТ [10]. Во всем диапазоне уровней накачки наблюдается генерация на двух МШГ, что обусловлено малой величиной рассогласования между положением резонансной длины волны микрорезонатора и положением максимума спектра фотолюминесценции КТ (gain to cavity detuning, GCD) [13]. Значение GCD, полученное на основе анализа спектров фотолюминесценции КТ, измеренных с торца гетероструктуры, составило 12 meV. Порядок азимутальных мод оценен на основе выражения $m = \pi D n_{eff} / \lambda$, где λ — длина волны генерации. Показано, что линии МШГ с длиной волны генерации 930 и 951 nm соответствуют генерации на 36-й и 35-й модах. Для обоих мод наблюдается расщепление линии генерации на две составляющие (рис. 1).

Типичная для лазерной генерации с высокой величиной доли спонтанного излучения в моде микрорезонатора [9] слабая S-образная зависимость интегральной интенсивности люминесценции от уровня оптической накачки для двух линий вблизи 951 nm представлена на рис. 2, а. Проведена аппроксимация дан-

ных на основе зависимости $n(P_{pump})$, при этом обратная зависимость мощности накачки P_{pump} от среднего числа экситонов n определена с помощью выражения [12,15]: $P_{pump} = \Gamma n(1 + 2\xi + 2\beta(n - \xi))/\beta(1 + 2n)$, где ξ — среднее число экситонов, соответствующее порогу прозрачности, β — доля спонтанного излучения в моде микрорезонатора (β -фактор). Величина $\xi' = \xi/\beta$ определена на основе двухуровневой модели [16,17]: $\xi' = N/2 \cdot \tau \Gamma$, где N — число КТ в микролазере данного диаметра, τ — время излучательной рекомбинации. Величина весового фактора Γ определена с помощью выражения [15]: $\Gamma = A \cdot 2\pi\Delta E(1 + 2n)/(h(1 + 2\xi))$, где ΔE — полуширина линии генерации, A — весовой фактор между скоростью накачки и P_{pump} . Модельные кривые соответствуют β -фактору, равному 0.9%. Оценочная пороговая мощность $P_{th} = \Gamma(1 + 2\xi + 2\beta(1 - \xi))/3\beta$ составила $\sim 180 \mu W$. Данное значение сопоставимо с ранее представленными результатами для микролазеров с генерацией на МШГ, но при накачке через боковую поверхность микрорезонатора ($P_{th} = 235 \mu W$ при 20 K [18]). Величина добротности микрорезонатора Q , измеренная на пороге лазерной генерации (bare Q -factor), равнялась 16 000 и 14 000 для коротковолновой и длинноволновой мод. Дальнейшее повышение уровня оптической накачки привело к увеличению добротности микрорезонатора, как минимум, до 20 000 (ограничена спектральным разрешением монохроматора).

Проведена оценка спектрального сдвига положения мод (величины ΔE) с увеличением уровня оптической накачки (рис. 2, б). При низком уровне накачки наблюдается коротковолновый сдвиг положения линий генерации, обусловленный увеличением числа свободных носителей заряда, концентрация которых пропорциональна мощности оптической накачки [9]. При превышении уровня оптической накачки в $400 \mu W$ наблюдается длинноволновый сдвиг положения линий генерации, что свидетельствует о превалировании вклада, обусловленного тепловыми эффектами [9]. Превышение порогового уровня накачки в 10 раз (~ 1.8 mW) приводит к сдвигу положения линии генерации на величину около $220 \mu eV$. Из рис. 2, б следует, что величина расщепления МШГ составила $67 \mu eV$ вблизи порога генерации и $80 \mu eV$ при $10P_{th}$. Ранее максимальная величина расщепления в $3 \mu m$ -микролазере с генерацией на вертикальной моде не превышала $70 \mu eV$ [6] и соответствовала эллиптичности микрорезонатора, равной 10%.

Таким образом, в работе представлены первые результаты по реализации бимодальной генерации на модах шепчущей галереи в лазерах с вертикальным микрорезонатором. Использование зеркал, не поглощающих на длине волны накачки, позволило снизить пороговую мощность накачки до $180 \mu W$, более чем в 10 раз в сравнении с микролазерами с расщеплением вертикальной моды, обусловленной эллиптичностью микрорезонатора [6]. Снижение тепловой нагрузки лазера позволило реализовать сверхмалый сдвиг длины волны генерации с увеличением уровня накачки ($220 \mu eV$ при $10P_{th}$), что

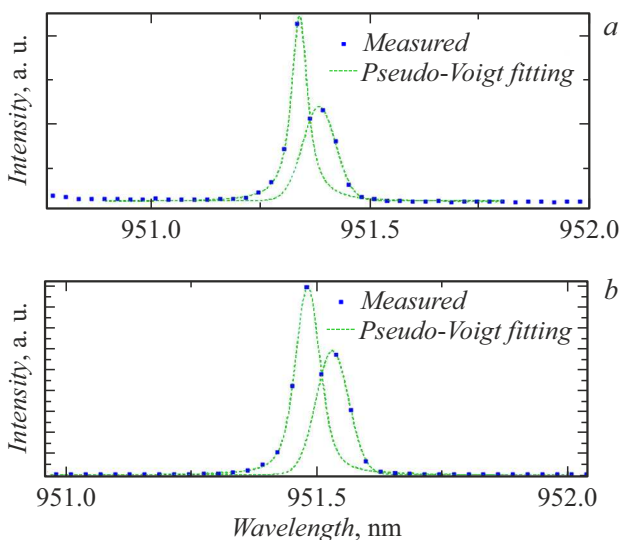


Рис. 1. Спектры генерации при мощности оптической накачки $183 \mu W$ (а) и 1.65 mW (б) с результатом аппроксимации (пунктирные линии) для каждого из пиков (на основе функции псевдо-Войта [9,14]).

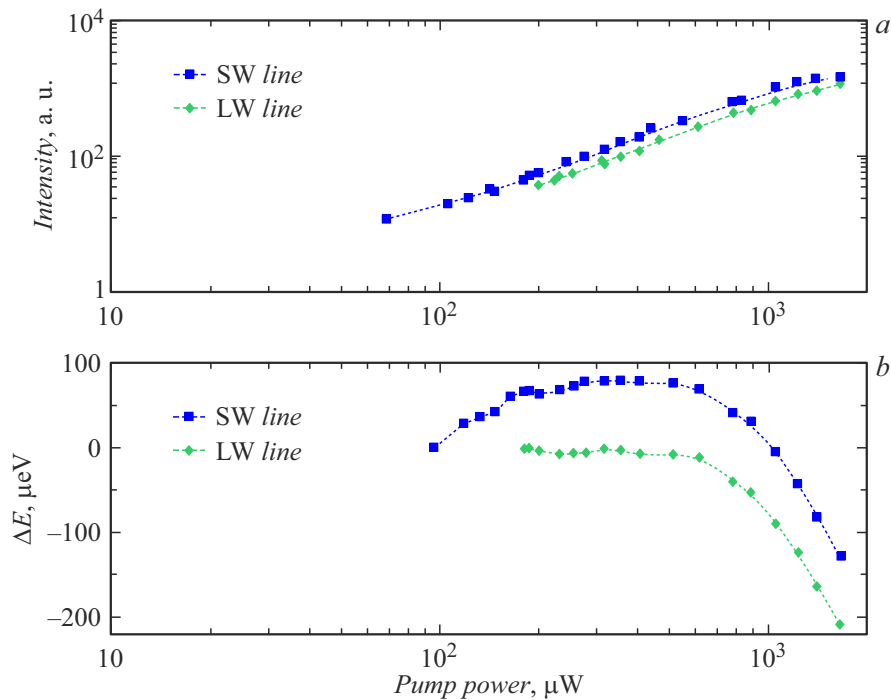


Рис. 2. *a* — зависимость интегральной интенсивности излучения от мощности оптической накачки для моды с длиной волны генерации 951.34 nm (SW line) и 951.39 nm (LW line). *b* — спектральный сдвиг положения коротковолновой (SW line) и длинноволновой (LW line) мод с увеличением уровня оптической накачки.

соотносится с ранее представленными результатами для случая генерации на вертикальной моде ($250 \mu\text{eV}$ при $10P_{th}$ [9]) в микролазерах с непоглощающими зеркалами. Проведена оценка межмодового расстояния при различных уровнях накачки. Показано, что максимальное расщепление МШГ составляет порядка $80 \mu\text{eV}$, что соответствует разнице частот линий бимодальной генерации в 20 GHz. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение динамики поляризации в спиновых лазерах на основе сформированных вертикальных микрорезонаторов.

Финансирование работы

Работа авторов из ФТИ им. А.Ф. Иоффе выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00221 (<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] A. Liu, P. Wolf, J.A. Lott, D. Bimberg, *Photon. Res.*, **7** (2), 121 (2019). DOI: 10.1364/prj.7.000121
- [2] M. Lindemann, G. Xu, T. Pusch, R. Michalzik, M.R. Hofmann, I. Žutić, N.C. Gerhardt, *Nature*, **568** (7751), 212 (2019). DOI: 10.1038/s41586-019-1073-y
- [3] K. Panajotov, *Opt. Lett.*, **49** (13), 3789 (2024). DOI: 10.1364/ol.531094
- [4] M. Zou, X.-H. Jia, W.-J. Song, S.-S. Deng, M.-Y. Bao, Y.-Q. Tang, J.-T. Lv, X.-Y. Li, X. Zhang, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63** (9), 092004 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad7791
- [5] S. Guessoum, A. Kyriazis, T. Malica, J. Van Erps, G. Van Steenberge, M. Virte, *Opt. Lett.*, **49** (15), 4477 (2024). DOI: 10.1364/ol.532942
- [6] N. Heermeier, T. Heuser, J. Große, N. Jung, A. Kaganskiy, M. Lindemann, N.C. Gerhardt, M.R. Hofmann, S. Reitzenstein, *Laser Photon. Rev.*, **16** (4), 2100585 (2022). DOI: 10.1002/lpor.202100585
- [7] S. Ates, S.M. Ulrich, P. Michler, S. Reitzenstein, A. Löffler, A. Forchel, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (16), 161111 (2007). DOI: 10.1063/1.2724908
- [8] D.M. Whittaker, P.S.S. Guimaraes, D. Sanvitto, H. Vinck, S. Lam, A. Daraei, J.A. Timpson, A.M. Fox, M.S. Skolnick, Y.-L.D. Ho, J.G. Rarity, M. Hopkinson, A. Tahaoui, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (16), 161105 (2007). DOI: 10.1063/1.2722683
- [9] 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
- [10] Y.-R. Nowicki-Bringuier, J. Claudon, C. Böckler, S. Reitzenstein, M. Kamp, A. Morand, A. Forchel, J.M. Gérard. *Opt. Express*, **15** (25), 17291 (2007). DOI: 10.1364/oe.15.017291

- [11] V.N. Astratov, S. Yang, S. Lam, B.D. Jones, D. Sanvitto, D.M. Whittaker, A.M. Fox, M.S. Skolnick, A. Tahraoui, P.W. Fry, M. Hopkinson, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (7), 071115 (2007). DOI: 10.1063/1.2771373
- [12] B.D. Jones, M. Oxborrow, V.N. Astratov, M. Hopkinson, A. Tahraoui, M.S. Skolnick, A.M. Fox, *Opt. Express*, **18** (21), 22578 (2010). DOI: 10.1364/oe.18.022578
- [13] F. Albert, T. Braun, T. Heindel, C. Schneider, S. Reitzenstein, S. Höfling, L. Worschech, A. Forchel, *Appl. Phys. Lett.*, **97** (10), 101108 (2010). DOI: 10.1063/1.3488807
- [14] A. Koulas-Simos, J. Buchgeister, M.L. Drechsler, T. Zhang, K. Laiho, G. Sinatkas, J. Xu, F. Lohof, Q. Kan, R.K. Zhang, F. Jahnke, C. Gies, W.W. Chow, C.-Z. Ning, S. Reitzenstein, *Laser Photon. Rev.*, **16** (9), 2200086 (2022). DOI: 10.1002/lpor.202200086
- [15] P. Jaffrennou, J. Claudon, M. Bazin, N.S. Malik, S. Reitzenstein, L. Worschech, M. Kamp, A. Forchel, J.-M. Gérard, *Appl. Phys. Lett.*, **96** (7), 071103 (2010). DOI: 10.1063/1.3315869
- [16] J.-M. Lourtioz, H. Benisty, V. Berger, J.-M. Gérard, D. Maystre, A. Tchebnokov, *Photonic crystals. Towards nanoscale photonic devices*, 2nd ed. (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
- [17] A. Babichev, I. Makhov, N. Kryzhanovskaya, A. Blokhin, Y. Zadiranov, Y. Saliy, 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
- [18] 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