

05

## Ширина линии излучения вертикально-излучающих лазеров с внутрирезонаторными контактами спектрального диапазона 89X nm

© Я.Н. Ковач<sup>1</sup>, С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>, М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> НТЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур,  
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: j-n-kovach@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 06.05.2024 г.

В окончательной редакции 11.07.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Исследовано влияние размера токовой оксидной апертуры на статические и спектральные характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 89X nm с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои и композиционные брэгговские решетки. Приборы демонстрируют стабильный одномодовый режим генерации с фиксированным направлением линейной поляризации излучения при размере апертур вплоть до 2  $\mu\text{m}$ , тогда как при больших размерах наблюдается переключение в многомодовый режим. Показано, что перегрев активной области с ростом тока ведет к аномальному поведению зависимости ширины спектральной линии от выходной оптической мощности. Перегрев наступает быстрее при меньших размерах апертуры, поэтому увеличение размера апертуры позволяет уменьшить ширину спектральной линии до 30 MHz при выходной оптической мощности  $\sim 1 \text{ mW}$ .

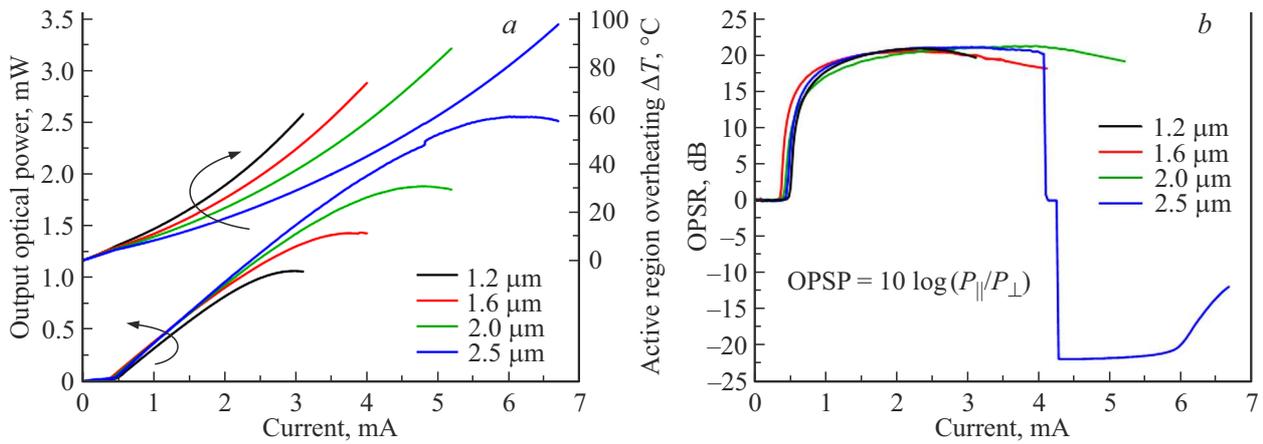
**Ключевые слова:** вертикально-излучающий лазер, ширина линии, атомные сенсоры.

DOI: 10.61011/OS.2024.12.59797.6646-24

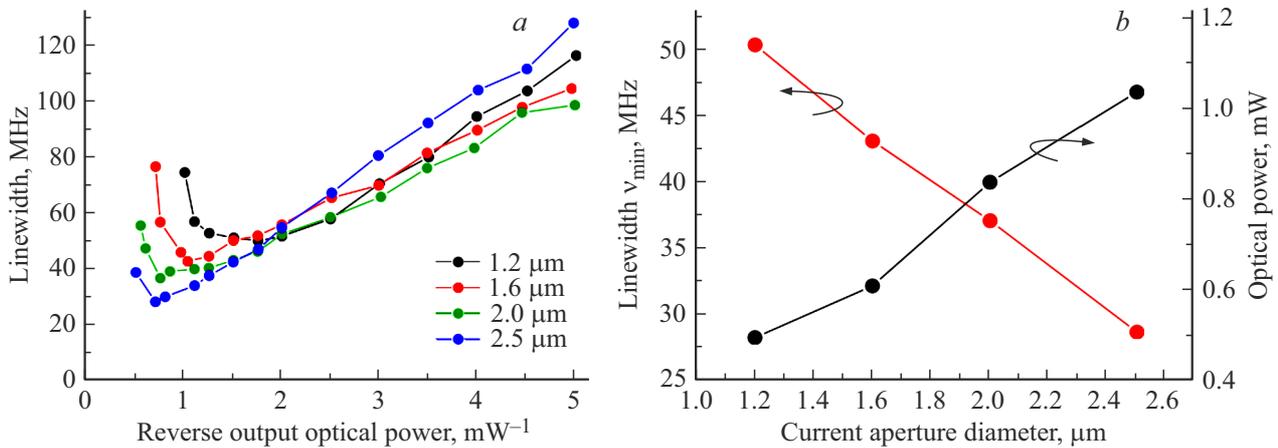
Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) ближнего ИК диапазона интересны не только для создания оптических межсоединений короткой протяженности и систем распознавания изображений, но также крайне перспективны для создания компактных квантовых сенсоров на основе паров атомов щелочных металлов [1]. Для применения в компактных атомных сенсорах к лазерным излучателям предъявляется ряд жестких требований, одним из которых является малая ширина спектральной линии в режиме одномодовой лазерной генерации [2]. Согласно теории Шавлова-Таунса-Генри, ширина линии излучения инжекционного лазера обратно пропорциональна не только выходной оптической мощности, но и квадрату времени жизни фотонов в резонаторе [3]. С одной стороны, ввиду относительно высокого теплового сопротивления ВИЛ повышение выходной оптической мощности сопряжено с резким ростом внутренней температуры лазера из-за саморазогрева лазера, что ограничивает предельную выходную оптическую мощность [4]. Кроме того, работа ВИЛ в режиме повышенной плотности тока негативно сказывается на его надежности. С другой стороны, для ВИЛ характерно относительно малое время жизни фотонов в резонаторе из-за короткой длины вертикального оптического резонатора, что делает снижение ширины спектральной линии излучения менее 100 MHz для классической конструкции ВИЛ с инжекцией носителей заряда через легированные распределенные брэгговские отражатели (РБО) [5,6] нетри-

виальной задачей. Таким образом, сужение спектральной линии излучения одномодовых ВИЛ возможно либо за счет увеличения геометрической длины оптического резонатора или эффективной длины резонатора, либо за счет уменьшения потерь на вывод излучения путем увеличения отражательной способности выводного зеркала. Однако снижение уровня оптических потерь на вывод излучения ведет к падению выходной оптической мощности (что критично для квантовых магнитометров и ядерных магнитных гироскопов) и сопряжено с усилением нестабильности поляризации излучения ВИЛ в условиях слабо выраженного поляризационного дихроизма (т.е. без внешних методов стабилизации поляризации). Наиболее очевидным решением увеличения времени жизни фотонов в резонаторе является увеличение эффективной длины микрорезонатора за счет использования внутрирезонаторных контактов, что сопряжено с риском увеличения внутренних оптических потерь [7].

Сравнительно недавно нами была предложена и успешно апробирована гибридная конструкция ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои для обеспечения одномодового режима генерации с фиксированным направлением линейной поляризации излучения [8]. Особенностью данной конструкции ВИЛ является применение композиционных брэгговских решеток, которые позволяют эффективно перераспределить элек-



**Рис. 1.** (a) Ватт-амперные характеристики и зависимости температуры активной области от тока; (b) зависимости OPR (как отношение значений выходной оптической мощности лазера, измеренных вдоль и перпендикулярно главной оси поляризатора) от силы тока. Температура 20°C.



**Рис. 2.** (a) Зависимости ширины спектральной линии  $\Delta\nu(P)$  для ВИЛ с различным диаметром токовой оксидной апертуры. (b) Зависимости минимальной ширины линии  $\Delta\nu_{\text{min}}$  и соответствующей выходной оптической мощности от характерного размера токовой оксидной апертуры. Температура 20°C.

ромагнитное поле стоячей волны в микрорезонаторе и одновременно обеспечить низкий уровень внутренних оптических потерь [9] и увеличить эффективную длину резонатора более чем в два раза по сравнению с классической конструкцией ВИЛ [10].

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния размера токовой оксидной апертуры на ширину спектральной линии такого типа ВИЛ спектрального диапазона 89X nm.

Конструктивно исследованные лазеры представляют собой вертикальный микрорезонатор, ограниченный нижним полупроводниковым  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  и верхним диэлектрическим  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  РБО. В качестве активной области использованы напряженные квантовые ямы  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ . Токвое и оптическое ограничения обеспечиваются селективно-окисленной апертурой. Детали конструкции приведены в [8,9].

На рис. 1, a приведены ватт-амперные характеристики для ВИЛ с различным диаметром токовой оксидной апертуры, измеренные при 20°C. Приборы демонстрируют лазерную генерацию с субмиллиамперными пороговыми токами и дифференциальной эффективностью более 0.55 W/A.

Анализ спектров излучения показал, что одномодовый режим лазерной генерации вблизи диапазона 89X nm с фактором подавления боковых мод более 30 dB во всем диапазоне токов реализуется для ВИЛ при характерном размере токовой оксидной апертуры вплоть до 2  $\mu\text{m}$ . Следует отметить, что выходное оптическое излучение ВИЛ является линейно-поляризованным с фактором подавления ортогональной поляризации (orthogonal polarization suppression ratio, OPSR) более 15 dB вплоть до токов насыщения выходной оптической мощности (рис. 1, b). Фиксация направления поляризации и отсутствие эффекта переключения поляризации обеспечи-

вается за счет анизотропии механических напряжений вблизи активной области, возникающих на оксидной апертуре ромбовидной формы [11]. При больших размерах апертуры (более  $2.5\ \mu\text{m}$ ) возможными становится лазерная генерация через поперечные моды высшего порядка, сопровождаемая скачкообразным увеличением выходной оптической мощности и переключением направления поляризации излучения.

На рис. 2, *a* представлены экспериментальные зависимости ширины линии излучения линии  $\Delta\nu$  от уровня выходной оптической мощности линии  $P$  для различного размера токовой оксидной апертуры, полученные с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо с разрешающей способностью 7.5 МГц. На начальном участке  $\Delta\nu(P)$  ширина линии сужается по мере роста мощности  $P$ , при этом экстраполяция зависимости дает значение остаточной ширины спектральной линии  $\sim 10\text{--}20$  МГц, которая обусловлена фликкершумом и/или конкуренцией поперечных мод [3]. На втором участке  $\Delta\nu(P)$  присутствует аномальное поведение, выраженное в уширении спектральной линии несмотря на дальнейший рост мощности  $P$ , что ограничивает минимально-достижимое значение ширины спектральной линии  $\Delta\nu_{\text{min}}$ . Оценка внутренней температуры активной области исследуемых ВИЛ по величине теплового сопротивления приборов (рис. 1, *a*) выявило корреляцию по току между областью перехода ко второму участку зависимости  $\Delta\nu(P)$  и резким ростом внутренней температуры.

Таким образом, выявленное аномальное поведение зависимости  $\Delta\nu(P)$  обусловлено саморазогревом лазера, которое ведет к росту  $\alpha$ -фактора [12] и уширению спектральной линии ВИЛ.

Следует отметить, что для лазеров с меньшим размером апертуры наблюдается более сильный перегрев активной области по сравнению с широкоапертурными лазерами при сравнимой выходной оптической мощности (рис. 1, *a*), что обусловлено более высоким тепловым сопротивлением и ростом дополнительных оптических потерь из-за рассеяния/дифракции света на границе оксид-полупроводник [9], приводящих к росту порогового тока и снижению дифференциальной эффективности ВИЛ. В результате по мере увеличения характерного размера токовой оксидной апертуры наблюдается падение минимального значения  $\Delta\nu_{\text{min}}$  с 50 МГц при выходной оптической мощности  $\sim 0.5\ \text{mW}$  для прибора с апертурой  $1.2\ \mu\text{m}$  до 30 МГц при выходной оптической мощности  $\sim 1\ \text{mW}$  для прибора с апертурой  $2.5\ \mu\text{m}$  (рис. 2, *b*). Дальнейшее увеличение размера апертуры требует применения дополнительных методов селекции поперечных мод и формирования поляризационно-селективных потерь.

Таким образом, проведены исследования влияния размера токовой оксидной апертуры на ширину спектральной линии одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои и композиционные брэгговские

решетки. Показана принципиальная возможность сужения спектральной линии до 30 МГц без существенного изменения уровня внутренних оптических потерь и потерь на вывод излучения.

Полученные в ходе работы данные лишь незначительно уступают рекордно-низким значениям: 23 МГц при выходной оптической мощности  $\sim 0.45\ \text{mW}$  для ВИЛ спектрального диапазона 85X nm с расширенным оптическим резонатором [7] и 23 МГц при выходной оптической мощности  $\sim 0.91\ \text{mW}$  для ВИЛ классической геометрией вертикального микрорезонатора спектрального диапазона 89X nm с субволновой решеткой в выводном РБО [13]. Полученные результаты крайне важны при создании компактных квантовых сенсоров на основе паров атомов щелочных металлов.

### Финансирование работы

Исследования выполнены при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FFUG-2022-0011).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] B.D. Padullaparthi, J.A. Tatum, K. Iga. *VCSEL Industry: Communication and Sensing* (Wiley-IEEE Press, 2021), p. 352.
- [2] J. Kitching. *Appl. Phys. Rev.*, **5**(3), 031302 (2018). DOI: 10.1063/1.5026238
- [3] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (John Wiley & Sons, 2012), p. 583.
- [4] С.А. Блохин, Н.А. Малеев, М.А. Бобров, А.Г. Кузьменков, А.В. Сахаров, В.М. Устинов. *Письма в ЖТФ*, **44**(1), 7 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45428.17057
- [5] D. Kuskenskov, S. Feld, C. Wilmsen, H. Temkin, S. Swirhun, R. Leibenguth. *Appl. Phys. Lett.*, **66**(3), 277 (1995). DOI: 10.1063/1.113516
- [6] С.А. Блохин, М.А. Бобров, А.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, Ю.М. Задиранов, Е.А. Европейцев, А.В. Сахаров, Н.Н. Леденцов, Л.Я. Карачинский, А.М. Оспенников, Н.А. Малеев, В.М. Устинов. *ФТП*, **52**(1), 98 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.01.45326.8657
- [7] D.K. Serkland, G.A. Keeler, K.M. Geib, G.M. Peake, K.D. Choquette, C. Lei. *Proc. SPIE*, **7229**, 722907 (2009). DOI: 10.1117/12.809455
- [8] С.А. Блохин, Н.А. Малеев, М.А. Бобров, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, Ю.М. Задиранов, М.М. Кулагина, А.А. Блохин, Ю.А. Гусева, А.М. Оспенников, М.В. Петренко, А.Г. Гладышев, А.Ю. Егоров, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, В.М. Устинов. *Квант. электрон.*, **49**(2), 187–190 (2019).
- [9] С.А. Блохин, М.А. Бобров, А.А. Блохин, Я.Н. Ковач, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Ю.М. Задиранов, М.М. Кулагина, Ю.А. Гусева, А.П. Васильев,

- В.М. Устинов. Письма в ЖТФ, **49** (20), 43–46 (2023).  
DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56347.19717
- [10] С.А. Блохин, М.А. Бобров, А.Г. Кузьменков, А.А. Блохин, А.П. Васильев, Ю.А. Гусева, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, Н.А. Малеев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. Письма в ЖТФ, **44** (1), 67 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45432.17029
- [11] М.А. Бобров, Н.А. Малеев, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, А.А. Блохин, А.П. Васильев, Ю.А. Гусева, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, С.И. Трошков, В. Лисак, В.М. Устинов. ФТП, **50** (10), 1408–1413 (2016).
- [12] H. Halbritter, R. Shau, F. Riemenschneider, B. Kögel, M. Ortsiefer, J. Roskopf, G. Böhm, M. Maute, M.-C. Amann, P. Meissner. Electron. Lett., **40** (20), 1266 (2004).  
DOI: 10.1049/el:20046457
- [13] F. Gruet, A. Al-Samaneh, E. Kroemer, L. Bimboes, D. Miletic, C. Affolderbach, D. Wahl, R. Boudot, G. Mileti, R. Michalzik. Opt. Express, **21** (5), 5781 (2013).  
DOI: 10.1364/OE.21.005781