

09

## Влияние конструкции резонатора на ширину линии одномодовых вертикально-излучающих лазеров ближнего ИК-диапазона

© С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1,2</sup>, А.А. Блохин<sup>1,2</sup>,  
А.П. Васильев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Гусева<sup>1,2</sup>, М.М. Кулагина<sup>1</sup>,  
Ю.М. Задиранов<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1,3</sup>, И.И. Новиков<sup>4</sup>,  
Л.Я. Карачинский<sup>1,4</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>5</sup>, В.М. Устинов<sup>1,2,6</sup>

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

<sup>2</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> VI Systems GmbH, Berlin, Germany

<sup>6</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 сентября 2017 г.

Проведены исследования ширины линии излучения одномодовых вертикально-излучающих лазеров ближнего ИК-диапазона с активной областью на основе квантовых ям InGaAs/AlGaAs и различной конструкции оптического микрорезонатора. При малых потерях на вывод излучения лазеры с  $1\lambda$ -резонатором и инжекцией носителей через распределенные брэгговские отражатели демонстрируют ширину линии излучения 70 MHz с ее ростом до 110 MHz при повышении потерь на вывод излучения (соответствующая дифференциальная эффективность  $\sim 0.65$  W/A). Применение конструкции оптического резонатора с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контакты и низкодобротные композиционные брэгговские решетки позволяет снизить ширину линии излучения до 40 MHz, несмотря на высокие потери на вывод излучения (соответствующая дифференциальная эффективность  $\sim 0.6$  W/A).

DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45432.17029

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) ближнего ИК-диапазона 850 nm находят широкое применение в высокоскоростных оптических системах передачи данных, различных датчиках перемещения, лазерных интерферометрах и газовых сенсорах [1]. В последнее время большое внимание уделяется возможности использования одномодовых ВИЛ для задач оптической спектроскопии. Для классической геометрии вертикального оптического микрорезонатора ширина линии лазерной генерации ВИЛ с токовой апертурой, сформированной методом ионной имплантации (так называемая имплантационная токовая апертура), типично лежит в диапазоне 100–150 MHz [2]. Однако в работах [3,4] была продемонстрирована возможность уменьшения ширины линии излучения ВИЛ спектрального диапазона 980 nm с имплантационной токовой апертурой до  $\sim 20$ –30 MHz, по-видимому за счет снижения потерь на вывод излучения (соответствует дифференциальной эффективности  $\sim 0.1$  W/A). Однако в ВИЛ с имплантационной токовой апертурой крайне сложно реализовать стабильный одномодовый режим генерации с малыми рабочими токами и высокой выходной мощностью из-за отсутствия эффективного оптического ограничения в латеральном направлении и высокого уровня потерь на радиационных дефектах, вызванных ионной имплантацией. Частичное решение указанной проблемы возможно для вариантов конструкции ВИЛ с селективным латеральным травлением слоев выводного зеркала вблизи резонатора (так называемая воздушная токовая апертура). Снижение уровня потерь на вывод излучения (дифференциальная эффективность  $\sim 0.29$  W/A) в ВИЛ спектрального диапазона 760 nm с воздушной токовой апертурой позволило достичь рекордно низкой ширины линии излучения  $\sim 3$  MHz при выходной мощности  $\sim 0.8$  mW [5]. Однако проблемы безызлучательной поверхностной рекомбинации и низкой механической надежности делают лазеры данного типа малоперспективными для практического применения.

В то же время ВИЛ, в которых токовое и оптическое ограничение реализовано методом селективного окисления слоев AlGaAs (так называемая оксидная токовая апертура) или с помощью формирования туннельного перехода (так называемая туннельная токовая апертура), позволяют преодолеть проблемы, характерные для ВИЛ с имплантационной токовой апертурой. Уменьшение потерь на вывод излучения (дифференциальная эффективность  $\sim 0.12$  W/A) позволило снизить ширину линии излучения ВИЛ спектрального диапазона 1550 nm с туннельной токовой апертурой до  $\sim 20$  MHz при выходной мощности  $\sim 0.8$  mW [6].

Применение аналогичного подхода для ВИЛ спектрального диапазона 850 nm с оксидной токовой апертурой позволило уменьшить ширину линии излучения до  $\sim 50$  MHz при выходной мощности 0.7 mW [7]. Следует отметить, что снижение потерь на вывод излучения ведет к падению дифференциальной эффективности лазеров. Возможность дальнейшего сужения линии излучения ВИЛ связана с увеличением эффективной длины микрорезонатора, однако при этом необходимо сохранить низкий уровень внутренних оптических потерь. Прямое увеличение геометрической длины микрорезонатора сопряжено с проблемой обеспечения эффективной инжекции носителей в активную область (особенно дырок). В работе [8] было показано, что увеличение толщины одного слоя в легированном распределенном брэгговском отражателе (РБО)  $n$ -типа вблизи оптического резонатора до  $\sim 1 \mu\text{m}$  позволяет уменьшить ширину линии излучения ВИЛ спектрального диапазона 850 nm до 23 MHz (при выходной мощности  $\sim 0.45$  mW) и сохранить относительно низкий пороговый ток при дифференциальной эффективности  $\sim 0.4$  W/A. Однако такой подход сопряжен с падением модального усиления активной области из-за снижения фактора оптического ограничения в продольном направлении. В связи с этим представляется актуальным поиск альтернативных подходов сужения линии генерации ВИЛ при сохранении высокой эффективности прибора.

Настоящая работа посвящена исследованию ширины линии излучения одномодовых вертикально-излучающих лазеров ближнего ИК-диапазона с активной областью на основе квантовых ям InGaAs/AlGaAs и различной конструкцией оптического микрорезонатора: микрорезонатор с геометрическим расстоянием между РБО в одну длину волны (так называемый  $1\lambda$ -резонатор) с инжекцией носителей через легированные зеркала (далее ВИЛ-1) и  $1\lambda$ -резонатор с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контакты и низкодобротные композиционные брэгговские решетки (далее ВИЛ-2). Рассмотрено влияние уровня потерь на вывод излучения при модификации выводного зеркала.

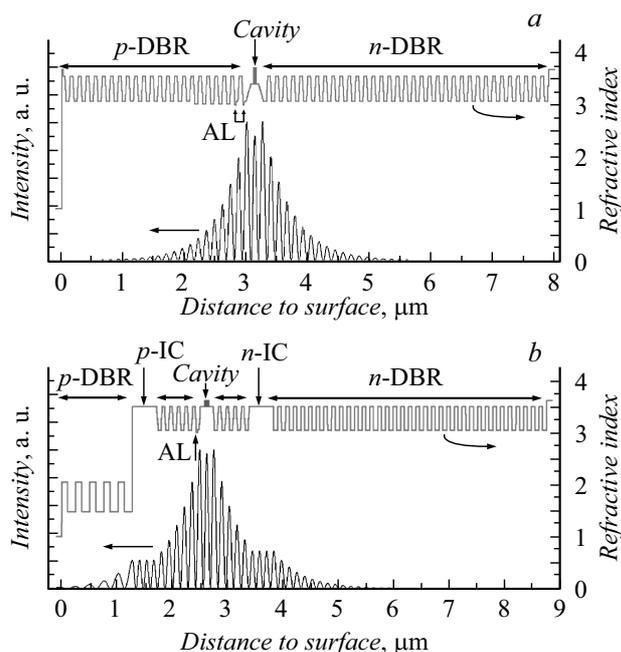
Конструктивно ВИЛ-1 представляет собой микрорезонатор с выводом излучения вверх и состоит из контактного слоя  $n^+$ -GaAs, высокодобротного РБО  $n$ -Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As, микрорезонатора  $1\lambda$ -AlGaAs с активной областью на основе квантовых ям In<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>As, высокодобротного РБО  $p$ -Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As с двумя апертурными слоями  $p$ -Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As и контактного слоя  $p^+$ -GaAs. Особенности технологического процесса изготовления ВИЛ-1 приведены

в [9]. Вследствие анизотропии процесса селективного окисления слоев AlGaAs токовая оксидная апертура имеет форму квадрата [10].

Конструктивно ВИЛ-2 состоит из нижнего высокодобротного РБО  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , внутрирезонаторного контактного слоя  $n\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ , низкодобротной композиционной брэгговской решетки  $n\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , микрорезонатора  $1\lambda\text{-AlGaAs}$  с активной областью на основе квантовых ям  $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ , низкодобротной композиционной брэгговской решетки  $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  с одним апертурным слоем  $p\text{-AlAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , внутрирезонаторного контактного слоя  $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$  и верхнего (выводного) диэлектрического РБО  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ . Перед локальным осаждением диэлектрического РБО слой  $p\text{-GaAs}$ , обеспечивающий формирование омического контакта к внутрирезонаторному контактному слою  $p$ -типа, селективно удаляется в пределах светоизлучающей области лазера для предотвращения роста внутренних оптических потерь. Выбор системы материалов для диэлектрического РБО связан с необходимостью минимизации шероховатости интерфейсов и флуктуации показателя преломления аморфных слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , изготовленных методом реактивного магнетронного распыления. Особенности технологического процесса изготовления ВИЛ-2 приведены в [11]. Конструкция апертурного слоя позволяет получить ромбовидную токовую оксидную апертуру и снимает вырождение фундаментальной моды по поляризации [12].

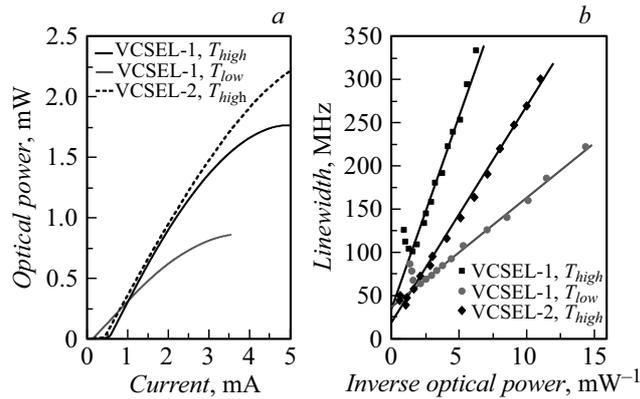
На рис. 1 представлены распределение интенсивности электромагнитного поля стоячей волны и профиль показателя преломления в микрорезонаторах ВИЛ-1 и ВИЛ-2. В случае ВИЛ-1 электромагнитное поле стоячей волны сконцентрировано в слое микрорезонатора  $1\lambda\text{-AlGaAs}$  и экспоненциально затухает в зеркалах, при этом эффективная длина микрорезонатора с учетом конечной глубины проникновения электромагнитного поля в РБО составляет  $\sim 1.5\ \mu\text{m}$ . В то же время в ВИЛ-2 существенная доля электромагнитного поля стоячей волны оказывается сосредоточенной во внутрирезонаторных контактных слоях в силу малого коэффициента отражения композиционных брэгговских решеток. В результате электромагнитное поле стоячей волны в ВИЛ-2 распределено по большей длине структуры, чем в случае ВИЛ-1, что приводит к увеличению эффективной длины резонатора до  $\sim 2.5\ \mu\text{m}$ .

На рис. 2, а приведены ватт-амперные характеристики одномодовых ВИЛ-1 и ВИЛ-2 с характерным размером токовой оксидной апертуры  $2\ \mu\text{m}$ , измеренные в непрерывном режиме работы при комнатной



**Рис. 1.** Расчетное распределение электромагнитного поля стоячей волны и профиль показателя преломления в ВИЛ-1 (a) и ВИЛ-2 (b). DBR — распределенный брэгговский отражатель, cavity — резонатор, AL — апертурный слой, IC — внутрирезонаторные контактные слои *n*- и *p*-типа.

температуре. Управление потерями на вывод излучения осуществлялось путем модификации коэффициента отражения выводного РБО с помощью сухого травления приповерхностного слоя верхнего (выводного) зеркала. При высоких потерях на вывод излучения ВИЛ-1 демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током  $\sim 0.56$  мА, дифференциальной эффективностью  $\sim 0.65$  Вт/А, максимальной выходной оптической мощностью  $\sim 1.7$  мВт, тогда как ВИЛ-2 демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током  $\sim 0.44$  мА, дифференциальной эффективностью  $\sim 0.6$  Вт/А, максимальной выходной оптической мощностью  $\sim 2.2$  мВт. Уменьшение потерь на вывод излучения ВИЛ-1 ведет к снижению порогового тока до 0.18 мА, а также падению диф-



**Рис. 2.** Типичные ватт-амперные характеристики (а) и зависимости ширины линии излучения от обратной оптической мощности (b) для ВИЛ-1 (VCSEL-1) и ВИЛ-2 (VCSEL-2) с характерным размером токовой оксидной апертуры  $\sim 2 \mu m$ . Измерения проведены при температуре  $20^\circ C$ .  $T_{low}$  — низкие потери на вывод излучения,  $T_{high}$  — высокие потери на вывод излучения.

ференциальной эффективности до  $0.36 W/A$  и максимальной выходной оптической мощности до  $0.9 mW$ .

Поляризационные исследования ВИЛ-1 показали, что при высоких потерях на вывод излучения, несмотря на вырождение фундаментальной моды резонатора по поляризации, преобладает одно направление поляризации излучения с фактором подавления ортогональной поляризации (OPSR) более  $15 dB$  во всем рабочем диапазоне токов, однако при малых потерях на вывод излучения наблюдаются переключение поляризации излучения и гистерезис. Такое поведение, по-видимому, обусловлено наличием слабого электрооптического эффекта или механических напряжений, которые ведут к снятию вырождения фундаментальной моды по поляризации, но с малой степенью дискриминации второй моды, что в условиях низких потерь на вывод излучения приводит к возможности достижения порогового условия обеими модами. В случае ВИЛ-2 фиксированная поляризация с OPSR более  $15 dB$  наблюдается во всем рабочем диапазоне токов благодаря ромбовидной токовой оксидной апертуре [13].

На рис. 2, b приведены результаты измерения ширины линии излучения доминирующей моды ВИЛ-1 и ВИЛ-2 с помощью сканиру-

ющего интерферометра Фабри–Перо Thorlabs SA-200 (разрешающая способность 7.5 МГц) в зависимости от обратной оптической мощности. Для обоих типов лазеров при превышении порога генерации с ростом тока накачки сначала наблюдается падение ширины линии излучения обратно пропорционально выходной оптической мощности согласно выражению [1,14]

$$\Delta\nu_L = \frac{h\nu n_{sp}\eta_0}{4\pi\tau_p^2 P} (1 + \alpha^2) + \Delta\nu_0,$$

где  $P$  — выходная оптическая мощность,  $h\nu$  — энергия излучаемых фотонов,  $\tau_p$  — время жизни фотонов в резонаторе,  $\eta_0$  — внешняя квантовая эффективность,  $n_{sp}$  — фактор инверсной заселенности (типично  $\sim 1.5$ ),  $\alpha$  — фактор уширения спектральной линии (далее  $\alpha$ -фактор),  $\Delta\nu_0$  — остаточная ширина линии, связанная с фликер-шумом или конкуренцией поперечных мод. Однако при дальнейшем росте тока накачки наблюдается сильное отклонение от классической теории поведения ширины линии излучения в зависимости от выходной оптической мощности [14]: насыщение и уширение линии генерации одномодовых лазеров с ростом выходной оптической мощности. В результате при высоких потерях на вывод излучения ширина линии генерации ВИЛ-1 достигает минимального значения  $\sim 100$  МГц при выходной оптической мощности  $\sim 0.8$  мВт и затем увеличивается до  $\sim 120$ – $140$  МГц с ее ростом. Уменьшение потерь на вывод излучения ведет к двукратному росту времени жизни фотонов в резонаторе ВИЛ-1, однако ширина линии генерации ВИЛ-1 падает лишь до 65 МГц, а затем линия снова уширяется до 90 МГц с ростом выходной оптической мощности, причем при фиксированном уровне выходной оптической мощности наблюдается слабое изменение ширины линии с модификацией времени жизни фотонов в резонаторе. Такое поведение, по-видимому, обусловлено увеличением  $\alpha$ -фактора вследствие более высокого значения вариации показателя преломления активной области с изменением концентрации носителей: с одной стороны, сдвиг резонансной длины волны вблизи порога, обусловленный изменением показателя преломления активной области, практически не зависит от величины порогового тока (т.е. от уровня потерь на вывод излучения), а с другой — концентрация носителей падает с уменьшением потерь на вывод. Полученные данные коррелируют с результатами для ВИЛ в классической геометрии микрорезонатора и суммарными потерями  $\sim 0.4\%$  на проход резонатора [8]. Дальнейшее уменьшение ширины линии ВИЛ-1 без увеличения

эффективной длины резонатора возможно лишь за счет еще большего снижения потерь на вывод излучения и минимизации внутренних оптических потерь [4,6].

Благодаря увеличению эффективной длины резонатора ВИЛ-2 до  $2.5\ \mu\text{m}$  удается получить более узкую линию генерации при высоком уровне потерь на вывод излучения по сравнению с ВИЛ-1 при идентичном уровне выходной оптической мощности. Так, ширина линии излучения ВИЛ-2 достигает минимального значения  $\sim 40\ \text{MHz}$  при выходной оптической мощности  $\sim 1.2\ \text{mW}$ . Следует отметить, что ширина линии излучения ВИЛ-2 не превышает уровня  $50\ \text{MHz}$  вплоть до  $2\ \text{mW}$ , когда наблюдается существенный тепловой загиб ватт-амперной характеристики.

Причина неклассического поведения ширины линии излучения исследованных ВИЛ с ростом выходной оптической мощности, по-видимому, связана с режимом работы одномодового лазера в условиях высокой плотности носителей и фотонов в микрорезонаторе, когда с ростом тока накачки утечка носителей и сильный саморазогрев ведут к быстрому насыщению усиления и падению дифференциального усиления и в конечном счете к росту  $\alpha$ -фактора [15,16]. Следует отметить, что уменьшение характерного размера токовой апертуры исследованных ВИЛ приводит к росту минимального значения ширины линии излучения. Данный факт связан с падением времени жизни фотонов в резонаторе и увеличением  $\alpha$ -фактора вследствие роста внутренних оптических потерь из-за рассеяния света на границе оксид–полупроводник и из-за дополнительного падения эффективности токовой инжекции ввиду роста утечки носителей при их повышенной концентрации. В связи с этим одновременное увеличение характерного размера апертуры ВИЛ-2 на 20–30% и уменьшение потерь на вывод излучения ( $\sim 0.25\%$  на проход) позволили снизить ширину линии генерации до уровня  $\sim 20\text{--}25\ \text{MHz}$  при выходной оптической мощности  $0.5\text{--}1\ \text{mW}$  при дифференциальной эффективности  $\sim 0.43\ \text{W/A}$ . Возможные способы дальнейшего его сужения линии излучения ВИЛ-2 при сохранении высокой эффективности лазера связаны с оптимизацией конструкции композиционных решеток и увеличением толщины внутрирезонаторного контактного слоя  $n$ -типа.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение конструкции оптического микрорезонатора с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контакты и низкодобротные композиционные брэгговские решетки позволяет сузить линию генерации ВИЛ

ближнего ИК-диапазона до 40–50 МГц при выходной оптической мощности 1–2 мВт и дифференциальной эффективности  $\sim 0.6$  W/A. Полученные приборные характеристики демонстрируют перспективы использования ВИЛ данной конструкции в задачах оптической спектроскопии.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 1 „Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий“ (проект № 1144).

## Список литературы

- [1] *Michalzik R.* // VCSELs: Fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting Lasers / Ed. R. Michalzik. Berlin: Springer-Verlag, 2013. P. 560.
- [2] *Kuksenkov D., Feld S., Wilmsen C.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. Iss. 3. P. 277.
- [3] *Reiner G., Zeeb E., Möller B.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1995. V. 7. Iss. 7. P. 730.
- [4] *Schmid W., Jung C., Weigl B.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1996. V. 8. Iss. 18. P. 1288.
- [5] *De Sopra F.M., Zappe H.P., Moser M.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1999. V. 11. Iss. 12. P. 1533.
- [6] *Bacou A., Rissons A., Mollier J.-C.* // Proc. SPIE. 2008. V. 6908. P. 69080F.
- [7] *Serkland D.K., Peake G.M., Geib K.M.* et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6132. P. 613208.
- [8] *Serkland D.K., Keeler G.A., Geib K.M., Peake G.M.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7229. P. 722907.
- [9] *Блохин С.А., Карачинский Л.Я., Новиков И.И.* и др. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 1. С. 81.
- [10] *Choquette K.D., Geib K.M., Ashby C.I.H.* et al. // IEEE J. Selected. Topics Quantum Electron. 1997. V. 3. Iss. 3. P. 916.
- [11] *Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М.* и др. // ФТП. 2013. Т. 47. В. 7. С. 985.
- [12] *Бобров М.А., Малеев Н.А., Блохин С.А.* и др. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1408.
- [13] *Nazaruk D.E., Blokhin S.A., Maleev N.A.* et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 572. P. 012036.
- [14] *Henry C.H.* // IEEE J. Quantum Electron. 1982. V. 18. Iss. 2. P. 259.
- [15] *Dowd P., Summers H.D., White I.H.* et al. // Electron. Lett. 1995. V. 31. Iss. 7. P. 557.
- [16] *Halbritter H., Chau R., Riemenschneider F.* et al. // Electron. Lett. 2004. V. 40. Iss. 20. P. 1266.