

09

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

© С.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, А.Г. Кузьменков^{1,2}, А.А. Блохин^{1,2},
А.П. Васильев^{1,2}, Ю.А. Гусева^{1,2}, М.М. Кулагина¹,
Ю.М. Задиранов¹, Н.А. Малеев^{1,3}, И.И. Новиков⁴,
Л.Я. Карачинский^{1,4}, Н.Н. Леденцов⁵, В.М. Устинов^{1,2,6}

¹ Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

⁵ VI Systems GmbH, Berlin, Germany

⁶ 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 1λ -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 ~ 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 ~ 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 ~ 20 –30 MHz, по-видимому за счет снижения потерь на вывод излучения (соответствует дифференциальной эффективности ~ 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 ~ 0.29 W/A) в ВИЛ спектрального диапазона 760 nm с воздушной токовой апертурой позволило достичь рекордно низкой ширины линии излучения ~ 3 MHz при выходной мощности ~ 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 ~ 0.12 W/A) позволило снизить ширину линии излучения ВИЛ спектрального диапазона 1550 nm с туннельной токовой апертурой до ~ 20 MHz при выходной мощности ~ 0.8 mW [6].

Применение аналогичного подхода для ВИЛ спектрального диапазона 850 nm с оксидной токовой апертурой позволило уменьшить ширину линии излучения до ~ 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 заужения 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 ~ 0.45 mW) и сохранить относительно низкий пороговый ток при дифференциальной эффективности ~ 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 1λ -резонатор) с инжекцией носителей через легированные зеркала (далее ВИЛ-1) и 1λ -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_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As, микрорезонатора 1λ -AlGaAs с активной областью на основе квантовых ям In_{0.08}Ga_{0.92}As, высокодобротного РБО p -Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As с двумя апертурными слоями p -Al_{0.98}Ga_{0.02}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 SiO_2 и Ta_2O_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

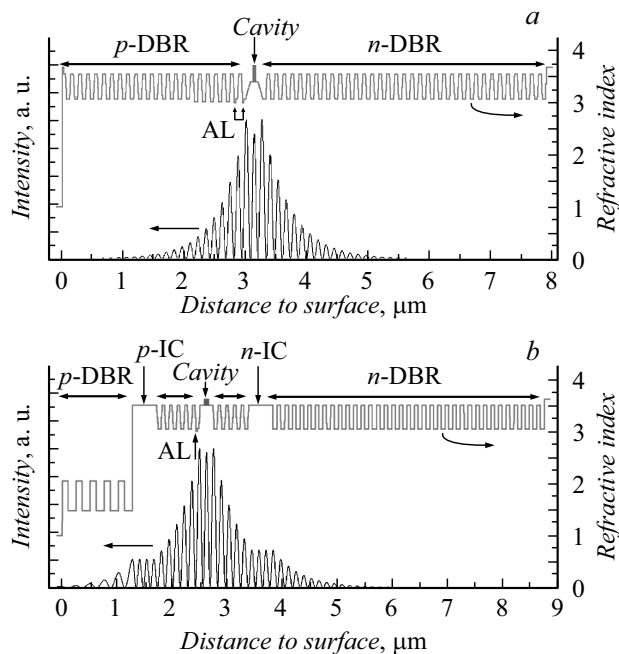


Рис. 1. Расчетное распределение электромагнитного поля стоячей волны и профиль показателя преломления в ВИЛ-1 (a) и ВИЛ-2 (b). DBR — распределенный брэгговский отражатель, cavity — резонатор, AL — апертурный слой, IC — внутрирезонаторные контактные слои *n*- и *p*-типа.

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 ~ 0.56 мА, дифференциальной эффективностью ~ 0.65 Вт/А, максимальной выходной оптической мощностью ~ 1.7 мВт, тогда как ВИЛ-2 демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током ~ 0.44 мА, дифференциальной эффективностью ~ 0.6 Вт/А, максимальной выходной оптической мощностью ~ 2.2 мВт. Уменьшение потерь на вывод излучения ВИЛ-1 ведет к снижению порогового тока до 0.18 мА, а также падению диф-

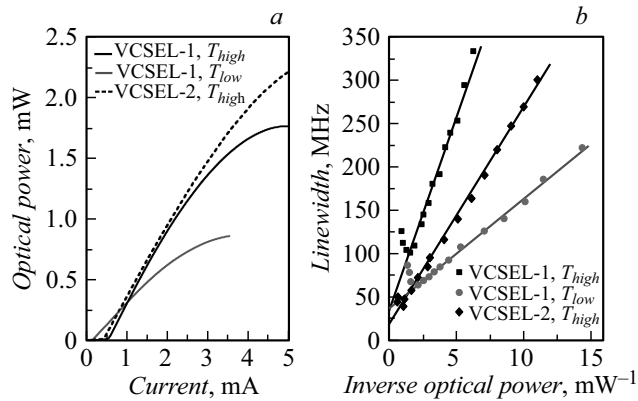


Рис. 2. Типичные ватт-амперные характеристики (а) и зависимости ширины линии излучения от обратной оптической мощности (b) для ВИЛ-1 (VCSEL-1) и ВИЛ-2 (VCSEL-2) с характерным размером токовой оксидной апертуры $\sim 2 \mu m$. Измерения проведены при температуре $20^\circ C$. T_{low} — низкие потери на 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 MHz) 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, τ_p — время жизни фотонов в резонаторе, η_0 — внешняя квантовая эффективность, n_{sp} — фактор инверсной заселенности (типично ~ 1.5), α — фактор уширения спектральной линии (далее α -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 ~ 100 MHz при выходной оптической мощности ~ 0.8 mW и затем увеличивается до ~ 120 – 140 MHz 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 MHz, а затем линия снова уширяется до 90 MHz 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 α -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 $2.5\ \mu\text{m}$ удастся 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 α -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 α -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 ~ 0.6 Вт/А. 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.