

07.2;07.3

Анализ внутренних оптических потерь вертикально-излучающих лазеров с внутррезонаторными контактами спектрального диапазона 89X nm

© С.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, А.А. Блохин¹, Я.Н. Ковач¹, Н.А. Малеев¹, А.Г. Кузьменков¹, Ю.М. Задиранов¹, М.М. Кулагина¹, Ю.А. Гусева¹, А.П. Васильев², В.М. Устинов²

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

² НТЦ микроэлектроники, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 августа 2023 г.

В окончательной редакции 11 сентября 2023 г.

Принято к публикации 12 сентября 2023 г.

Представлены исследования статических характеристик вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 89X nm в геометрии вертикального микрорезонатора с внутррезонаторными контактами и токовой селективно-окисленной апертурой ромбовидной формы, которая одновременно обеспечивает возможность получения одномодового режима генерации с узкой линией излучения. Проведена оценка уровня внутренних оптических потерь в зависимости от размера токовой селективно-окисленной апертуры. Предложенная конструкция лазера обеспечивает эффективность токовой инжекции $\sim 80\%$ и уровень внутренних оптических потерь менее 12 cm^{-1} (для эффективной длины резонатора $3.4 \mu\text{m}$) при характерном размере токовой апертуры в диапазоне $1.5\text{--}3 \mu\text{m}$. Полученные результаты крайне важны для создания эффективных одномодовых вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 89X nm, необходимых для компактных атомных сенсоров.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, одномодовый режим, ширина линии, оптические потери.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56347.19717

В последние годы уделяется повышенное внимание вопросу минимизации габаритных размеров и энергопотребления различного рода атомных сенсоров, что возможно лишь при использовании вместо газоразрядных ламп инжекционных лазерных диодов для оптической накачки атомов щелочных металлов и оптического детектирования их состояния [1]. Однако лазерные источники для компактных атомных сенсоров одновременно должны удовлетворять ряду специфических требований: точное соответствие частоты лазерного излучения определенному энергетическому переходу в энергетической структуре используемого щелочного атома (изотопы ^{133}Cs , ^{85}Ru или ^{87}Ru), одномодовый режим генерации и узкая спектральная линия излучения, линейно поляризованное излучение с фиксированным направлением плоскости поляризации, возможность надежного функционирования при повышенных рабочих температурах, быстроедействие и малое энергопотребление. Широко используемые в спектроскопии лазеры с внешним резонатором пригодны лишь для демонстрации эффекта или апробации той или иной концепции построения атомных сенсоров, тогда как в случае лазеров с распределенной обратной связью сложно обеспечить точную настройку на требуемую длину волны.

Уникальную возможность открывают вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ), представляющие собой вертикальный микрорезонатор, ограниченный двумя распределенными брэгговскими отражателями (РБО). Для

такого типа лазеров характерны возможность реализации одномодового режима генерации, субмиллиамперные пороговые токи, повышенная температурная стабильность, высокая пространственная симметрия выходного оптического излучения [2]. Более того, появляется возможность компактного размещения лазерного излучателя и оптической схемы фокусировки излучения непосредственно вблизи газовой ячейки. В настоящее время ВИЛ спектральных диапазонов 7XX и 8XX nm успешно апробированы в квантовых магнитометрах [3], ядерных магнитных гироскопах [4] и квантовых стандартах частоты [5]. Наиболее прямой подход к реализации одномодового режима генерации основан на уменьшении области инжекции носителей заряда в активную область с помощью токовой апертуры [6], тогда как для заужения линии излучения лазера следует увеличить время жизни фотонов в резонаторе за счет уширения оптического резонатора. Однако в конструкции ВИЛ с инжекцией носителей через легированные РБО это сопряжено с ростом последовательного сопротивления и риском увеличения внутренних оптических потерь, что негативно сказывается на долговременной надежности одномодовых лазеров (резкий рост плотности тока).

Недавно нами была предложена и успешно апробирована оригинальная конструкция ВИЛ спектрального диапазона 8XX nm с инжекцией носителей через внутррезонаторные контакты (ВРК), позволяющая од-

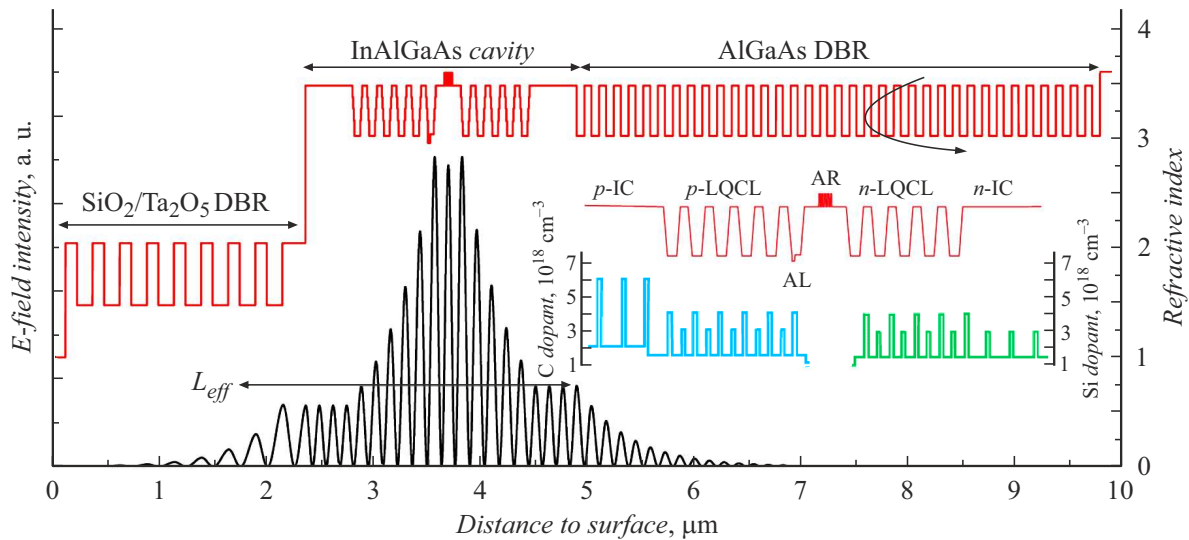


Рис. 1. Продольное распределение электромагнитного поля стоячей волны, показателя преломления и легирующих примесей (на вставке) в микрорезонаторе ВРК-ВИЛ. DBR — РБО, IC — ВРК, LQCL — НКР, AR — активная область, AL — апертурный слой.

новременно снизить последовательное сопротивление и уменьшить ширину линии излучения [7]. В настоящей работе представлены результаты анализа внутренних оптических потерь и эффективности токовой инжекции одномодовых лазеров такой конструкции.

Конструкция исследованных ВРК-ВИЛ представляет собой гибридный вертикальный оптический микрорезонатор, заключенный между нижним полупроводниковым РБО $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ и верхним диэлектрическим РБО $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$. Количество пар в РБО выбрано так, чтобы реализовать схему вывода излучения через верхний РБО. На рис. 1 приведено распределение электромагнитного поля стоячей волны, а также профили показателя преломления и легирования слоев гетероструктуры в продольном направлении (направлении эпитаксиального роста слоев). Активная область состоит из пяти квантовых ям $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$, разделенных барьерными слоями $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Носители заряда инжектируются в активную область через ВРК-слои $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ и низкодобротные композиционные решетки (НКР) $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Для снижения потенциальных барьеров на гетерограницах $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ реализованы градиентные интерфейсы с повышенным уровнем легирования — в 2–3 раза относительно среднего уровня легирования слоев резонатора ($\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Применение асимметричных пар слоев $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ и $n\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ в НКР позволило эффективно перераспределить электромагнитное поле продольной моды и увеличить эффективную длину резонатора L_{eff} более чем в 2 раза по сравнению с таковой в классической конструкции ВИЛ с инжекцией носителей через легированные РБО. Для снижения поглощения на свободных носителях (особенно в слоях p -типа) применен модулированный профиль

легирования примесями ВРК-слоев, когда сильнолегированные области располагаются в локальных минимумах электромагнитного поля волны. С целью возможности одновременного обеспечения токового и оптического ограничения в конструкцию гетероструктуры ВРК-ВИЛ введен апертурный слой $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, который на этапе изготовления кристаллов ВРК-ВИЛ позволяет сформировать токовую апертуру методом селективного окисления слоев AlGaAs в парах воды. Кроме того, апертурный слой также помещен в минимуме поля для ослабления эффекта рассеяния/дифракции света на границе оксид–полупроводник при уменьшении размеров селективно-окисленной аперттуры [8]. Нюансы приборной конструкции и особенности технологического процесса изготовления ВРК-ВИЛ приведены в работах [7,9].

На рис. 2, а представлены зависимости дифференциальной эффективности (скорость нарастания оптической мощности лазера с током выше порога лазерной генерации) от характерного размера селективно-окисленной токовой аперттуры ВРК-ВИЛ с восемью парами $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ в верхнем РБО, измеренные в непрерывном режиме работы при комнатной температуре. Оценка дифференциальной эффективности выполнялась вблизи порога генерации для минимизации влияния тепловых эффектов. При размерах токовой аперттуры менее $3 \mu\text{m}$ наблюдается падение дифференциальной эффективности. Данный факт не связан с изменением модового состава лазеров, так как при малых токах лазерная генерация идет через фундаментальную моду (одномодовый режим генерации во всем диапазоне токов сохраняется при аперттурах менее $2.5 \mu\text{m}$). Более того, по мере уменьшения размера токовой аперттуры наблюдается резкий рост пороговой плотности тока (рис. 2, а).

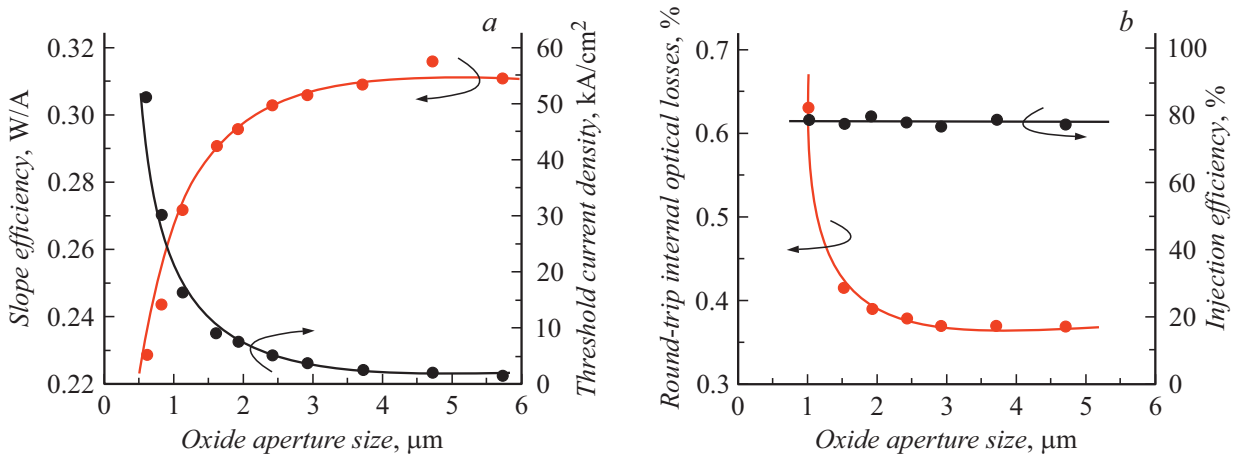


Рис. 2. *a* — зависимость дифференциальной эффективности и пороговой плотности тока от размера токовой апертуры для ВРК-ВИЛ с верхним РБО на основе восьми пар SiO₂/Ta₂O₅; *b* — зависимость внутренних оптических потерь на проход резонатора ВРК-ВИЛ от размера токовой апертуры. Температура 20°C.

Как известно, дифференциальная эффективность ВИЛ η_{SE} зависит от потерь на вывод излучения α_m , внутренних оптических потерь α_{int} , эффективности токовой инжекции носителей η_{int} :

$$\eta_{SE} = F_T \eta_{int} \left(\frac{E_{ph}}{q} \right) \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_{int}} \right),$$

где q — элементарный заряд, E_{ph} — энергия фотона. В случае применения зеркал с различными коэффициентами отражения необходимо ввести нормировочный коэффициент F_T для учета доли оптической мощности, выводимой через верхнее зеркало [2]. Следовательно, можно предположить как падение эффективности η_{int} вследствие включения дополнительных механизмов утечек носителей заряда, так и появление дополнительных внутренних оптических потерь. Для прояснения данного момента был выполнен анализ влияния уровня потерь на вывод излучения (вариации за счет изменения количества пар в диэлектрическом РБО) на дифференциальную эффективность лазеров с различным размером селективно-окисленной токовой апертуры по аналогии с работами [10–12]. Эффект концентрации носителей заряда по периметру токовой апертуры, приводящий к неоднородной инжекции носителей в активную область в пределах площади апертуры, наиболее ярко проявляется для широкоапертурных приборов с характерным размером апертуры более $6 \mu\text{m}$, поэтому эффективность токовой инжекции исследованных приборов слабо зависит от размера апертуры и достигает 78–80% (рис. 2, *b*). Иначе обстоит дело с потерями α_{int} : по мере увеличения размера апертуры наблюдается резкое падение величины α_{int} и ее фиксация на уровне $\sim 0.37\%$ на проход резонатора при размерах апертуры более $2.5 \mu\text{m}$ (рис. 2, *b*), что соответствует распределенным потерям на вывод излучения менее 11 cm^{-1} (при эффективной длине резонатора $3.4 \mu\text{m}$).

Таким образом, падение дифференциальной эффективности при малых размерах апертуры преимущественно связано с увеличением внутренних оптических потерь вследствие рассеяния/дифракции света на границе оксид–полупроводник [8,10]. Достигнутые уровни внутренних оптических потерь уступают рекордно низким потерям для монолитного ВИЛ спектрального диапазона 98X nm с токовой апертурой $12 \mu\text{m}$ [11] и монолитного ВРК-ВИЛ спектрального диапазона 98X nm с токовой апертурой $10 \mu\text{m}$ [12]. Однако они хорошо коррелируют с данными для монолитного ВИЛ спектрального диапазона 85X nm с коротким резонатором в широком диапазоне размеров апертур [10], что свидетельствует об эффективности предложенного подхода к созданию ВИЛ спектрального диапазона 89X nm для компактных атомных сенсоров.

Таким образом, в работе представлены результаты анализа уровня внутренних оптических потерь ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с внутррезонаторными контактами и токовой селективно-окисленной апертурой ромбовидной формы. Показано, что предложенная конструкция лазера обеспечивает эффективность токовой инжекции более $\sim 80\%$ при уровне внутренних оптических потерь менее 12 cm^{-1} , что крайне важно для минимизации пороговых токов в одномодовых лазерах с малым размером апертуры.

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] J. Kitching, *Appl. Phys. Rev.*, **5** (3), 031302 (2018). DOI: 10.1063/1.5026238
- [2] R. Michalzik, *VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers* (Springer-Verlag, Berlin, 2013). DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0
- [3] P.D.D. Schwindt, B. Lindseth, S. Knappe, V. Shah, J. Kitching, L.-A. Liew, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (8), 081102 (2007). DOI: 10.1063/1.2709532
- [4] D. Meyer, M. Larsen, *Gyroscopy Navig.*, **5** (2), 75 (2014). DOI: 10.1134/S2075108714020060
- [5] S. Knappe, V. Shah, P.D.D. Schwindt, L. Hollberg, J. Kitching, L.-A. Liew, J. Moreland, *Appl. Phys. Lett.*, **85** (9), 1460 (2004). DOI: 10.1063/1.1787942
- [6] W. Nakwaski, *Opto-Electron. Rev.*, **19** (1), 119 (2011). DOI: 10.2478/s11772-010-0075-y
- [7] 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, *Квантовая электроника*, **49** (2), 187 (2019). [S.A. Blokhin, N.A. Maleev, M.A. Bobrov, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Zadiranov, M.M. Kulagina, A.A. Blokhin, Yu.A. Guseva, A.M. Ospennikov, M.V. Petrenko, A.G. Gladyshev, A.Yu. Egorov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, V.M. Ustinov, *Quantum Electron.*, **49** (2), 187 (2019). DOI: 10.1070/QEL16871].
- [8] E.R. Hegblom, D.I. Babic, B.J. Thibeault, L.A. Coldren, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (2), 379 (1997). DOI: 10.1109/2944.605682
- [9] Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, А.П. Васильев, С.А. Блохин, А.С. Шуленков, С.И. Трошков, А.Г. Гладышев, А.М. Надточий, М.М. Павлов, М.А. Бобров, Д.Е. Назарук, В.М. Устинов, *ФТП*, **47** (7), 985 (2013). [N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, A.P. Vasil'ev, S.A. Blokhin, A.S. Shulenkov, S.I. Troshkov, A.G. Gladyshev, A.M. Nadtochiy, M.M. Pavlov, M.A. Bobrov, D.E. Nazaruk, V.M. Ustinov, *Semiconductors*, **47** (7), 993 (2013). DOI: 10.1134/s1063782613070166].
- [10] M. Jungo, F.M. di Sopra, D. Erni, W. Baechtold, *J. Appl. Phys.*, **91** (9), 5550 (2002). DOI: 10.1063/1.1462422
- [11] S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.V. Sakharov, M.M. Kulagina, Y.M. Shernyakov, I.I. Novikov, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, N.N. Ledentsov, G. Lin, J.Y. Chi, *IEEE J. Quantum Electron.*, **42** (9), 851 (2006). DOI: 10.1109/JQE.2006.880125
- [12] G.M. Yang, M.H. MacDugal, V. Pudikov, P.D. Dapkus, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7** (11), 1228 (1995). DOI: 10.1109/68.473454