

05

Анализ внутренних оптических потерь вертикально-излучающего лазера спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$, сформированного методом спекания пластин

© С.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, А.А. Блохин^{1,2}, А.Г. Кузьменков², Н.А. Малеев¹, В.М. Устинов²,
Е.С. Колодезный³, С.С. Рочас³, А.В. Бабичев³, И.И. Новиков³, А.Г. Гладышев³, Л.Я. Карачинский^{1,4},
Д.В. Денисов^{4,5}, К.О. Воропаев^{6,7}, А.С. Ионов⁷, А.Ю. Егоров³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

⁶ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,
173003 Великий Новгород, Россия

⁷ ОАО „ОКБ-Планета“,
173004 Великий Новгород, Россия

e-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 05.10.2018 г.

В окончательной редакции 22.10.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Представлены результаты исследования внутренних оптических потерь и эффективности токовой инжекции в вертикально-излучающих лазерах спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$, полученных методом спекания пластин высокодобротных брэгговских отражателей и активной области на основе тонких напряженных InGaAs/InAlGaAs квантовых ям. Показано, что предложенная конструкция лазера при комнатной температуре обеспечивает рекордно низкий уровень внутренних оптических потерь (менее 6.5 cm^{-1}) и высокую эффективность токовой инжекции (более 90%), что позволяет реализовывать субмиллиамперные пороговые токи. С ростом температуры до 85°C происходит падение эффективности токовой инжекции до 70% вследствие термического выброса носителей заряда из активной области, сопровождающееся повышением внутренних оптических потерь до 9.1 cm^{-1} из-за роста поглощения на свободных носителях и/или межподзонного поглощения в валентной зоне.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер (vertical-cavity surface-emitting laser), квантовая яма, эпитаксиальная гетероструктура.

DOI: 10.21883/OS.2019.07.47941.296-18

Значительные успехи в области повышения быстродействия вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ, англ. vertical-cavity surface-emitting laser — VCSEL) ближнего ИК диапазона в режиме токовой модуляции [1–3] стимулировали интерес к проблеме создания эффективных быстродействующих одномодовых ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ (далее длинноволновые ВИЛ), необходимых не только для цифровой передачи данных, в том числе на сверхкороткие расстояния, для кремниевой фотоники, но и для аналоговой передачи информации в оптоволоконных линиях связи и системах радиолокации. На предельное быстродействие инжекционного лазера существенное влияние оказывает уровень внутренних оптических потерь [4], что с учетом быстрого роста уровня потерь на свободных носителях (особенно в

слоях p -типа) при смещении в длинноволновую область спектра [5] требует использования специфической конструкции ВИЛ в виде вертикального оптического микрорезонатора с инжекцией носителей через внутриволноводные контактные слои (англ. intra-cavity contacted layer) и токовым ограничением на основе захороненного туннельного перехода (англ. buried tunnel junction), в котором минимизирована суммарная толщина слоев p -типа. Однако ряд фундаментальных проблем не позволяет реализовать всю лазерную структуру в предложенной конструкции в рамках единого эпитаксиального процесса и обуславливает необходимость применения высококонтрастных диэлектрических распределенных брэгговских отражателей (РБО) [6] или технологии спекания нескольких пластин с отдельными частями

лазерной структуры [7]. В рамках обоих подходов была успешно продемонстрирована возможность реализации безошибочной передачи данных на скорости передачи данных более 10 Gbit/s [8,9], а в случае применения геометрии короткого оптического резонатора с двумя высококонтрастными диэлектрическими зеркалами быстродействие ВИЛ в режиме прямой модуляции было увеличено до 50 Gbit/s [10].

Следует отметить, что гибридная конструкция ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ на основе InAlGaAs квантовых ям (КЯ) требует не только применения сложной планарной технологии изготовления кристаллов и возможности осаждения диэлектрических слоев с высоким контрастом показателей преломления, но и предъявляет повышенные требования к качеству (шероховатость поверхности и резкость границ) интерфейсов РБО в силу падения коэффициента отражения из-за рассеяния света [11]. Это ограничивает минимально-достижимый уровень внутренних оптических потерь ВИЛ гибридной конструкции на 10 cm^{-1} [10]. Теоретически шероховатость интерфейсов эпитаксиальных нелегированных AlGaAs РБО существенно ниже шероховатости интерфейсов диэлектрических зеркал, однако уровень внутренних оптических потерь ВИЛ спектрального диапазона $1.3 \mu\text{m}$ на основе InAlGaAs КЯ, полученных методом спекания пластин гетероструктур, синтезированных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМО), лишь на 10% ниже потерь для ВИЛ гибридной конструкции [12], что, по-видимому, обусловлено размытием гетерограниц и неоптимальным профилем легирования структуры. МПЭ потенциально позволяет обеспечить шероховатость на уровне отдельных монослоев и более резкие гетерограницы, в связи с чем вопрос оценки уровня внутренних оптических потерь таких ВИЛ представляется крайне актуальным.

В настоящей работе представлены результаты анализа уровня внутренних оптических потерь и эффективности токовой инжекции в ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$, полученных методом спекания двух пластин AlGaAs/GaAs РБО и активной области на основе нескольких тонких напряженных InGaAs/InAlGaAs КЯ.

Для формирования гетероструктуры ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ в рамках технологии спекания двух AlGaAs/GaAs РБО на подложках GaAs с активной областью InAlGaAs на подложке InP последовательно выполняются следующие процессы: эпитаксиальное выращивание гетероструктур РБО и активной области, спекание пластины активной области с пластиной верхнего РБО, селективное удаление подложки InP, спекание полученной структуры с пластиной нижнего РБО, селективное удаление подложки GaAs с верхнего РБО. Эпитаксиальная гетероструктура нижнего РБО состоит из подложки GaAs и 35 пар слоев $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}/\text{GaAs}$, тогда как гетероструктура верхнего — из подложки GaAs, стоп-слоя $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ и 20.5 пар $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$. Выбор составов слоев AlGaAs в РБО обусловлен необходимостью обеспечения максимально высокого контра-

ста показателей преломления (для достижения высокой отражательной способности при меньшем числе пар) и предотвращения нежелательного латерального окисления слоев AlGaAs после формирования мезоструктур из-за высокой химической активности, наблюдаемой для слоев с содержанием Al более 95%. Эпитаксиальная гетероструктура активной области InAlGaAs состоит из подложки InP, слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, нижнего внутрирезонаторного контактного слоя $n\text{-InP}$ толщиной 1λ с тонким контактным слоем $n\text{-In}_{0.66}\text{Ga}_{0.38}\text{As}_{0.72}\text{P}_{0.28}$, оптического резонатора толщиной 0.5λ из слоя $n\text{-InP}$, активной области на основе $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$, слоя $p\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и слоев туннельного перехода $p^+/n^+\text{-In}_{0.53}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$. Затем на поверхности гетероструктуры активной области InAlGaAs локальным травлением слоя $n^+\text{-In}_{0.53}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ формируют пространственный рельеф (мезы с диаметром $8 \mu\text{m}$) и выполняют операцию заравнивания внутрирезонаторным контактным слоем $n\text{-InP}$ толщиной 1λ . В результате спекания пластин формируется гибридная гетероструктура ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$, конструктивно состоящая из нижнего AlGaAs/GaAs РБО, нижнего внутрирезонаторного контактного слоя $n\text{-InP}$, оптического резонатора с активной областью на основе InGaAs/InAlGaAs КЯ и захороненным туннельным переходом $p^+/n^+\text{-InGa(Al)As}$, верхнего внутрирезонаторного контактного слоя $n\text{-InP}$ и верхнего AlGaAs/GaAs РБО [13]. Толщины и составы гетероструктуры выбраны так, чтобы проектное значение резонансной длины волны микрорезонатора лежало в диапазоне $1.535\text{--}1.565 \mu\text{m}$, а длина волны, соответствующая основному переходу КЯ, была смещена в коротковолновую сторону на $50\text{--}60 \text{ nm}$. На рис. 1 приведены распределение электромагнитного поля стоячей волны в области оптического микрорезонатора ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$, профиль показателя преломления и проектный профиль легирования слоев гетероструктуры. С целью снижения потерь на свободных носителях сильнолегированные слои туннельного перехода и контактные слои размещены в минимуме электромагнитного поля, а внутрирезонаторный контактный слой неоднородно легирован. Перед разделением на индивидуальные кристаллы ВИЛ верхний РБО был подвергнут дополнительному прецизионному травлению на глубину $\sim 70 \text{ nm}$ с целью увеличения потерь на вывод излучения для достижения максимальной дифференциальной эффективности лазера без драматического увеличения порогового тока. В дальнейшем снижение уровня потерь на вывод излучения осуществлялось с помощью локального осаждения низкодобротного диэлектрического $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ РБО с разным количеством пар.

На рис. 2 приведены вольт- и ватт-амперные характеристики ВИЛ с малыми потерями на вывод излучения, измеренные в непрерывном режиме работы при различной температуре. Изготовленные приборы демонстрируют эффективную лазерную генерацию через фундаментальную моду (так называемый одномодовый

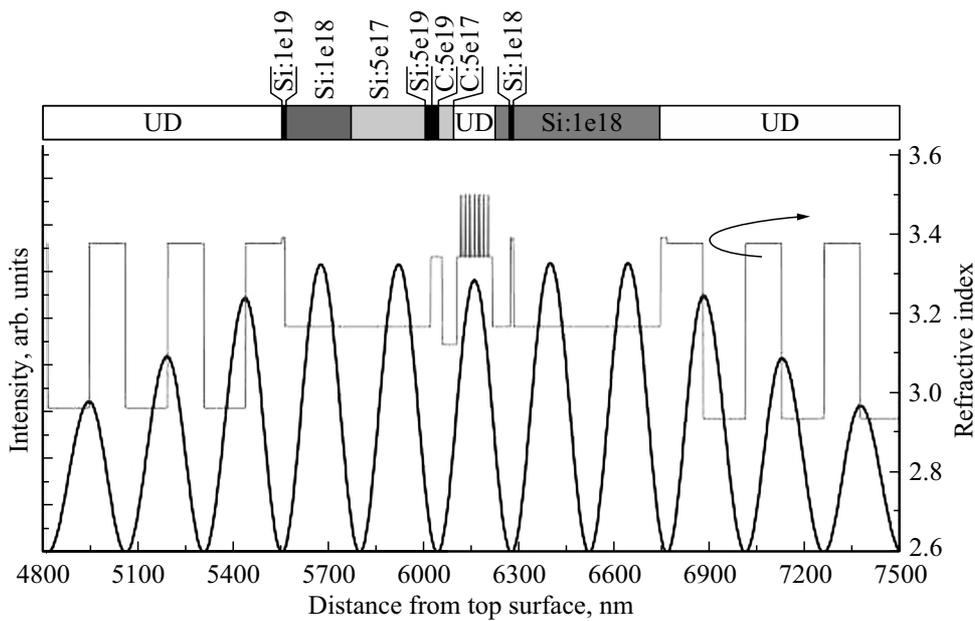


Рис. 1. Распределение интенсивности электромагнитного поля вдоль профиля показателя преломления и профиль легирования структуры в области микрорезонатора длинноволнового ВИЛ.

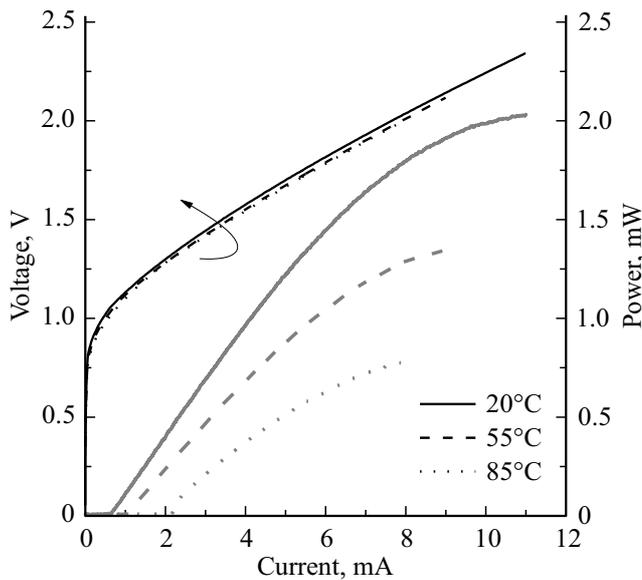


Рис. 2. Вольт- и ватт-амперные характеристики длинноволнового ВИЛ с различным уровнем распределенных потерь на вывод излучения, измеренные при различных температурах.

режим генерации) вблизи $1.56\text{--}1.57\ \mu\text{m}$ с фактором подавления мод высокого порядка более 30 dB. При температуре 20°C максимальная выходная мощность в одномодовом режиме генерации превышает 2 mW, а величина порогового тока составляет $\sim 0.6\ \text{mA}$. Дифференциальное сопротивление выше порога генерации быстро достигает своего минимального значения $110\text{--}120\ \Omega$ (по измерениям при токе накачки, равном половине тока насыщения выходной оптической мощности, когда

эффект саморазогрева не оказывает сильного влияния) и далее слабо зависит от тока накачки и температуры. По мере увеличения температуры наблюдается падение дифференциальной эффективности с 0.29 до 0.16 mW/A, сопровождающееся ростом порогового тока до 2.1 mA. Такое поведение может быть связано как с падением эффективности излучения активной области, так и с возрастанием утечки носителей и/или ростом уровня оптических потерь в лазере. Для прояснения вопроса были проведены оценки температурного поведения эффективности токовой инжекции и уровня внутренних оптических потерь на основе результатов измерений ватт-амперных характеристик.

Дифференциальная эффективность лазера η_{SE} , определяющая скорость нарастания выходной оптической мощности лазера с током накачки выше порога генерации, пропорциональна полной внешней квантовой эффективности η . Для корректной оценки внешней квантовой эффективности необходимо ввести нормирующий коэффициент $F_{T,B}$, учитывающий распределение выводимой оптической мощности между двумя зеркалами с учетом неравенства коэффициентов отражения нижнего (глухого) зеркала R_B и верхнего (выводного) зеркала R_T [14]:

$$F_{T,B} = \frac{\sqrt{R_{B,T}}}{\sqrt{R_T} + \sqrt{R_B}} \frac{1 - R_{T,B}}{1 - \sqrt{R_T R_B}}$$

При выводе излучения через верхнее РБО внешняя квантовая эффективность η может быть записана как $\eta = q\eta_{SE}/E_{ph}F_T$, где E_{ph} — энергия излучаемого фотона, q — заряд электрона. С другой стороны, эффективность токовой инжекции носителей η_{int} , внутренние оптические потери α_{int} и потери на вывод излучения α_m

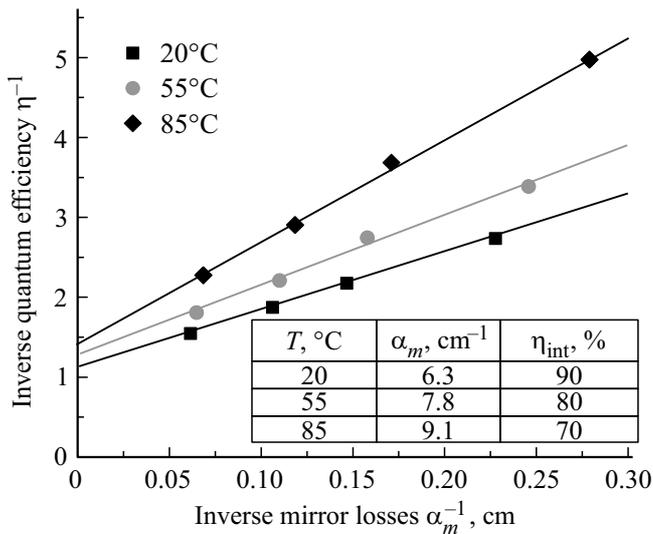


Рис. 3. Зависимости обратной внешней квантовой эффективности от обратных распределенных потерь на вывод излучения при различных температурах. На вставке приведены значения внутренних оптических потерь и эффективностью токовой инжекции.

(в нашем случае речь идет о распределенных потерях на вывод излучения) однозначно определяют полную внешнюю квантовую эффективность лазера:

$$\eta = \eta_{\text{int}} \frac{\alpha_m}{\alpha_{\text{int}} + \alpha_m}.$$

При этом потери на вывод излучения задаются значениями коэффициентов отражения зеркал РБО и эффективной длиной вертикального микрорезонатора L_{eff} согласно выражению:

$$\alpha_m = -\ln \sqrt{R_T R_B} / L_{\text{eff}}.$$

На рис. 3 представлены зависимости обратной внешней квантовой эффективности от обратной величины распределенных потерь на вывод излучения при различных температурах. Для минимизации влияния тепловых эффектов и нелинейности усиления при высокой плотности тока оценка дифференциальной эффективности проведена на линейном участке ватт-амперной характеристики вблизи порога генерации. Расчет коэффициентов отражения РБО осуществлялся с помощью метода матриц переноса [15], причем принималось во внимание не только частотная дисперсия показателей преломления слоев, но и их температурная зависимость (температурным расширением слоев можно пренебречь). С учетом конечной глубины проникновения электромагнитного поля в нелегированные РБО эффективная длина вертикального резонатора исследуемого ВИЛ составила $\sim 3.4 \mu\text{m}$. Линейная аппроксимация полученных экспериментальных данных позволила оценить значения η_{int} и α_m , которые приведены в таблице на вставке к рис. 3. С одной стороны, увеличение температуры ведет к

падению эффективности токовой инжекции до 70%, что в большей степени обусловлено ростом утечки инжектированных носителей в результате термического выброса носителей заряда из тонких InGaAs/InAlGaAs КЯ (так как проектная величина разрыва зоны проводимости между слоями КЯ и барьерами $\sim 100 \text{ meV}$). С другой стороны, с ростом температуры наблюдается увеличение внутренних оптических потерь до 9.1 cm^{-1} , которое, по-видимому, связано с увеличением поглощения на свободных носителях и/или межподзонным поглощением в валентной зоне [16]. Тем не менее, благодаря умеренному уровню легирования, лазеры обладают малыми внутренними оптическими потерями: $\sim 6.3 \text{ cm}^{-1}$ или $\sim 0.064 \text{ ps}^{-1}$ (при учете скорости света в среде $\sim 10^{10} \text{ cm/s}$) при температуре 20°C , что в совокупности с высокой эффективностью токовой инжекции обеспечивает возможность достижения низких пороговых токов. Следует отметить, что достигнутый уровень оптических потерь на 30–40% ниже опубликованных значений не только для ВИЛ спектрального диапазона $1.3/1.55 \mu\text{m}$ на основе толстых InAlGaAs КЯ, полученных методом спекания пластин [9,12], но и для рекордно быстродействующих ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ на основе толстых InAlGaAs КЯ с коротким резонатором, полученных с использованием гибридной конструкции длинноволновых ВИЛ [10].

В настоящей работе представлены результаты анализа уровня внутренних оптических потерь и эффективности токовой инжекции одномодовых ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ с активной областью на основе тонких напряженных InGaAs/InAlGaAs КЯ и нелегированных AlGaAs/GaAs РБО, полученных методом спекания пластин. Предложенная конструкция ВИЛ обеспечивает рекордно низкий уровень внутренних оптических потерь менее 6.5 cm^{-1} и эффективную токовую инжекцию.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития нанотехнологического комплекса России на 2014–2020 годы“, Соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. № 14.578.21.0253, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0253.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Li H., Wolf P., Moser P. et al. // IEEE J. Selected. Topics Quant. Electron. 2015. V. 21. N 6. P. 1700409.
- [2] Haglund E., Westbergh P., Gustavsson J.S. et al. // IEEE J. Lightwave Technol. 2016. V. 34. N 2. P. 269.

- [3] *Simpanen E., Gustavsson J.S., Haglund E. et al.* // Proc. 2017 IEEE Photonics Conference (IPC 2017), p. 65–66 (2017).
- [4] *Блохин С.А., Бобров М.А., Малеев Н.А. и др.* // ФТП. 2013. Т. 47. В. 6. С. 833.
- [5] *Babic D.I., Piprek J., Streubel K. et al.* // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33. N 8. P. 1369.
- [6] *Ortsiefer M., Baydar S., Windhorn K. et al.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 2005. V. 17. N 8. P. 1596.
- [7] *Syrbu A., Mircea A., Mereuta A. et al.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 2004. V. 16. N 5. P. 1230.
- [8] *Hofmann W.* // IEEE Phot. J. 2010. V. 2. N 5. P. 802.
- [9] *Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A. et al.* // Opt. Express 2014. V. 22. N 26. P. 32180.
- [10] *Spiga S., Soenen W., Andrejew A. et al.* // IEEE J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. N 4. P. 727.
- [11] *Bennett H.E., Porteus J.O.* // J. Opt. Soc. Am. 1961. V. 51. N 2. P. 123.
- [12] *Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A. et al.* // IEEE J. Selected Topics Quant. Electron. 2015. V. 21. N 6. P. 1700509.
- [13] *Coldren L.A., Corzine S.W.* Diode lasers and photonic integrated circuits. N.Y.: Wiley, 1995. 624 p.
- [14] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [15] *Jain M., Ironside C.N.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 2003. V. 15. N 5. P. 631.
- [16] *Sayid S.A., Marko I.P., Cannard P.J. et al.* // IEEE J. Quant. Electron. 2010. V. 46. N 5. P. 700.