

09

Вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$, сформированные методом спекания

© А.В. Бабичев^{1,2}, Л.Я. Карачинский^{1,2,3}, И.И. Новиков^{1,2,3},
А.Г. Гладышев^{1,2}, С.А. Блохин³, S. Mikhailov⁴, V. Iakovlev⁴,
A. Sirbu⁴, G. Stepniak⁵, L. Chorchos⁵, J.P. Turkiewicz⁵,
К.О. Воропаев^{6,7}, А.С. Ионов⁶, М. Agustin⁸, N.N. Ledentsov⁸,
А.Ю. Егоров^{1,2,¶}

¹ ООО „Коннектор Оптикс“, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ RTI-Research SA, Yverdon-les-Bains, Switzerland

⁵ Warsaw University of Technology, Institute of Telecommunications, Warsaw, Poland

⁶ ОАО „ОКБ-Планета“, Великий Новгород, Россия

⁷ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

⁸ VI Systems GmbH, Berlin, Germany

¶ E-mail: anton.egorov@connector-optics.com

Поступило в Редакцию 31 июля 2017 г.

Представлены результаты работ по формированию вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$, полученных методом спекания пластин AlGaAs/GaAs распределенных брэгговских отражателей и активной области на основе тонких квантовых ям, $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Лазеры с диаметром токовой апертуры $8\ \mu\text{m}$ демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме с пороговым током менее 1.5 мА, выходной оптической мощностью 6 мВт и КПД около 22%. Одномодовый режим генерации с коэффициентом подавления боковых мод в диапазоне значений 40–45 дБ сохраняется во всем диапазоне рабочих токов. Частота эффективной модуляции лазеров достигает 9 GHz, ограничена низкой паразитной частотой отсечки и саморазогревом.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45431.16993

Длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) представляют интерес для реализации оптической передачи данных не только на дальние дистанции, но и на сверхкороткие расстояния (в пределах для гибридной интеграции с кремниевыми оптическими и электронными схемами) [1]. По сравнению с ВИЛ ближнего ИК-диапазона ВИЛ спектрального диапазона $1.55\text{ }\mu\text{m}$ демонстрируют более низкую потребляемую мощность и меньшие оптические потери в кремниевом оптоволокне волноводах. Существует две основные технологии формирования высокоэффективных ВИЛ спектрального диапазона $1.55\text{ }\mu\text{m}$. Первая состоит в непосредственном выращивании гетероструктуры лазера на подложке InP с формированием захороненного туннельного перехода (ЗТП) [2], вторая основана на спекании пластины активной области, выращенной на подложке InP, с пластинами AlGaAs/GaAs распределенных брэгговских отражателей (РБО), выращенных на подложках GaAs [3].

ВИЛ спектрального диапазона $1.55\text{ }\mu\text{m}$, полученные методом спекания пластин, выращенных с применением металлоорганической газовой эпитаксии (МОГФЭ), демонстрируют безошибочную передачу данных на скоростях до 10 Gbit/s при высокой выходной оптической мощности в одномодовом режиме генерации (5.2 mW) [4,5]. В то же время ВИЛ спектрального диапазона $1.55\text{ }\mu\text{m}$, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на основе технологии ЗТП, в конструкции с коротким оптическим резонатором и диэлектрическими РБО демонстрируют большее быстродействие (скорость передачи данных до 56 Gbit/s) [2,6]. Однако малая выходная оптическая мощность ВИЛ с ЗТП (не превышает 2.2 mW в одномодовом режиме генерации [7]) не позволяет их использовать в системах плотного мультиплексирования с разделением по длине волны (DWDM-системы) [8,9].

Задача настоящей работы состоит в исследовании возможности формирования эффективных ВИЛ спектрального диапазона $1.55\text{ }\mu\text{m}$, полученных методом спекания пластин AlGaAs/GaAs распределенных брэгговских отражателей и активной области на основе тонких квантовых ям $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}$, выращенных методом МПЭ.

В качестве базовой конструкции ВИЛ использована геометрия оптического резонатора с нелегированными полупроводниковыми РБО, туннельным переходом (ТП) и инжекцией носителей в активную область через внутрирезонаторные контакты (см. нижнюю вставку на рис. 1) [4]. Гетероструктуры активной области и РБО изготовлены в ООО „Коннек-

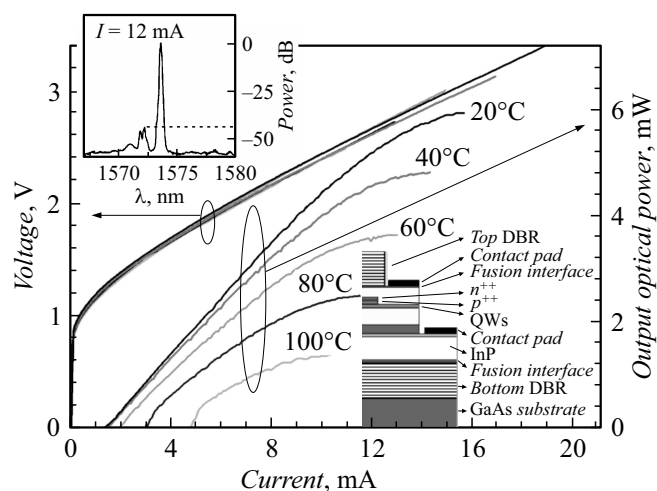


Рис. 1. Вольт- и ватт-амперные характеристики ВИЛ, измеренные в непрерывном режиме, в диапазоне температур 20–100°C. Верхняя вставка демонстрирует спектр лазерной генерации при 20°C, соответствующий току смещения 12 мА. На нижней вставке — схематический вид ВИЛ с внутрирезонаторной схемой контактов. *Top DBR* — верхний РБО, *contact pad* — контактная площадка, *fusion interface* — интерфейс спекания, n^{++} — сильнолегированная область $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$, легированная кремнием до уровня $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, p^{++} — сильнолегированная область $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$, легированная углеродом до уровня $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, QWs — квантовые ямы, *bottom DBR* — нижний РБО.

тор Оптикс“ на промышленной установке Riber 49. Активная область, выращенная на подложке InP, состоит из семи квантовых ям (КЯ) $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ толщиной 2.8 nm [10,11] с величиной упругих механических напряжений 1.4%, разделенных механически-ненапряженными барьерными слоями $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ толщиной 12 nm. Спектр фотолюминесценции активной области, измеренный при комнатной температуре, демонстрирует пик вблизи 1510 nm. Слои p^{++} и n^{++} ТП на основе твердых растворов $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$ легированы углеродом и кремнием соответственно до уровня $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Длина оптического резонатора составляет 2.5λ , диаметр апертуры ТП — $8 \mu\text{m}$. Верхний и нижний нелегированные РБО, выращенные на подложках GaAs, состоят

из 22.5 пар слоев $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ и 35 пар слоев $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}/\text{GaAs}$ соответственно. Лазеры сформированы путем двойного спекания пластин РБО с обеими сторонами активной области [3]. Толщины резонатора и РБО выбраны так, чтобы проектное значение резонансной длины волны микрорезонатора было смещено в длинноволновую область относительно пика усиления активной области на 50–60 nm. Для исследуемой спеченной структуры применено стравливание двух пар слоев $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ в верхнем РБО с последующим прецизионным травлением на глубину 70 nm для получения оптимального времени жизни фотонов в резонаторе [12].

Вольт- и ватт-амперные характеристики ВИЛ, измеренные в непрерывном режиме токовой накачки в диапазоне температур 20–100°C, представлены на рис. 1. При температуре 20°C приборы демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме работы с пороговым током менее 1.5 mA, дифференциальной эффективностью более 0.5 W/A и максимальной выходной оптической мощностью 6 mW. Максимальный КПД исследуемых ВИЛ составил 22%. Следует отметить, что 1.55 μm ВИЛ с аналогичной конструкцией оптического резонатора, полученный методом спекания пластин, выращенных методом МОГФЭ, заметно уступает по значениям порогового тока и дифференциальной эффективности [4]. С ростом температуры до 100°C наблюдается падение максимальной выходной оптической мощности до 1.5 mW, сопровождающееся увеличением порогового тока до 4.8 mA.

На верхней вставке к рис. 1 приведен спектр лазерной генерации, измеренный при 20°C и токе накачки 12 mA. Одномодовый режим генерации с фактором подавления боковых мод в диапазоне 40–45 dB наблюдается во всем рабочем диапазоне токов накачки и температур. Отметим, что высокоскоростные 1.55 μm ВИЛ на основе конструкции короткого оптического резонатора с ЗТП и диэлектрическими РБО демонстрируют одномодовый режим генерации лишь при апертурах ЗТП менее 5 μm , а максимальная выходная оптическая мощность не превышает 2.2 mW, что связано с сильным волноводным эффектом в такой конструкции лазера [7,13].

Для исследования динамических свойств одномодовых ВИЛ проведен анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) (параметр S_{21}) при различных токах накачки. АЧХ измерялись с использованием анализатора цепей (Agilent HP N5230A). Лазерное излучение через одномодовое оптоволокно регистрировалось фотодетектором с шири-

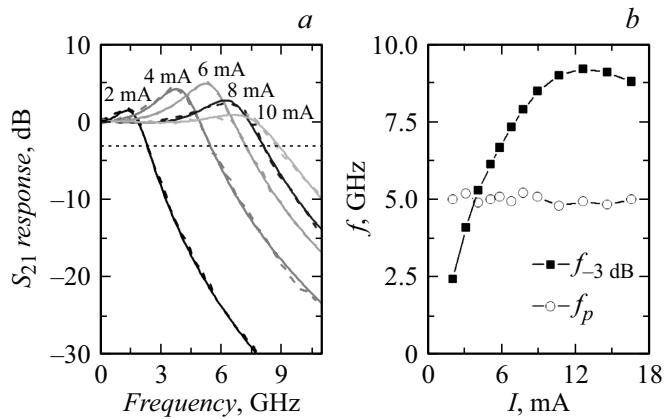


Рис. 2. *a* — частотные зависимости S_{21} , соответствующие различным токам накачки. Штриховые пунктирные линии — экспериментальные кривые, сплошные — результат аппроксимации. *b* — зависимости максимальной частоты эффективной модуляции $f_{-3\text{ dB}}$ (по уровню спада АЧХ на -3 dB) и паразитной частоты отсечки от тока накачки.

ной полосы пропускания 50 GHz. Результаты измерений показаны на рис. 2, *a* штриховыми линиями. Для экстраполяции ключевых параметров ВИЛ была применена модель отклика лазера на синусоидальную модуляцию тока накачки с некоторой частотой f

$$H(f) \propto \frac{f_R^2}{(f_R^2 - f^2 + j\gamma(f/2\pi))(1 + j(f/f_p))}, \quad (1)$$

где f_R — резонансная частота, γ — коэффициент затухания (damping), f_p — частота отсечки паразитного электрического фильтра нижних частот, образованного емкостями и сопротивлением прибора. Результаты аппроксимации представлены на рис. 2, *a* сплошными линиями. Максимальная частота эффективной модуляции $f_{-3\text{ dB}}$ (по уровню спада АЧХ на -3 dB) достигает 9 GHz при токе накачки 10 mA (рис. 2, *b*). Паразитная частота отсечки лежит в диапазоне 5–6 GHz, что не только влияет на конечное быстродействие лазера, но и может приводить к неопределенности в ходе решения обратной задачи при экстраполяции внутренних параметров лазера.

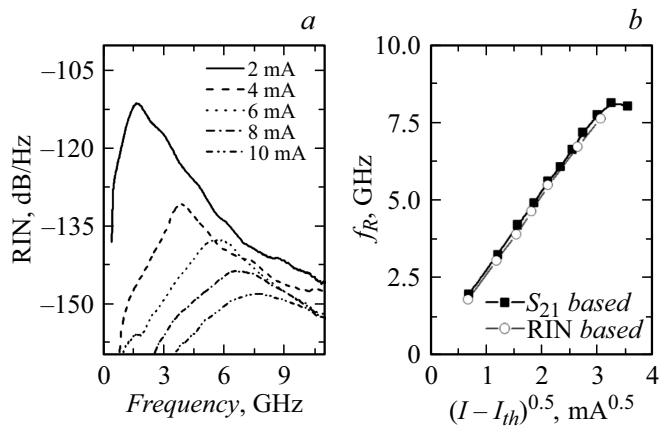


Рис. 3. *a* — частотные зависимости RIN, соответствующие различным токам смещения, *b* — зависимость резонансной частоты от корня квадратного тока накачки выше порога генерации. Значения f_R , определенные путем аппроксимации кривых $S_{21}(f)$, обозначены квадратами; данные, полученные путем анализа зависимостей $RIN(f)$, показаны кружками.

Для адекватной оценки резонансной частоты были проведены измерения относительной интенсивности шума (RIN) исследуемых ВИЛ, которые позволяют исключить влияние паразитных элементов. Измерения сигнала RIN проводились с использованием анализатора оптических сигналов HP 71400C. Шум лазера достигает максимума при токовой модуляции на резонансной частоте лазера (рис. 3, *a*), что позволяет с большей достоверностью оценить значения предельной резонансной частоты. Однако с ростом тока накачки также наблюдается падение максимального уровня шумов от -111 до -148 dB/Hz (рис. 3, *a*), что ведет к сглаживанию пика и затрудняет определение резонансной частоты при больших токах накачки. На рис. 3, *b* приведены зависимости резонансной частоты от корня квадратного тока накачки выше порога генерации. Значения f_R , определенные исходя из анализа частотных зависимостей RIN, приведены одновременно с данными, полученными из анализа зависимостей $S_{21}(f)$. В целом значения f_R , полученные разными методами, близки, а скорость нарастания резонансной частоты с током (так называемый *D*-фактор) лежит в

диапазоне $2.7\text{--}2.8\text{ GHz}/(\text{mA})^{0.5}$. Определенный по наклону зависимости $\gamma(f_R^2)$ K -фактор составляет 0.27 ns .

Полученные данные позволяют оценить теоретический предел частоты эффективной модуляции для исследуемого ВИЛ. Так, максимальная частота эффективной модуляции, ограниченная тепловыми эффектами, зависит только от предельного значения резонансной частоты как $f_{-3\text{ dB},\text{thermal}} = \sqrt{1 + \sqrt{2}} f_{R,\text{max}}$ и достигает уровня 13 GHz . Максимальная частота эффективной модуляции, определяемая эффектом демпфирования релаксационных колебаний, зависит от K -фактора как $f_{-3\text{ dB},\text{damping}} \approx 2\pi\sqrt{2}/K$ и достигает 30 GHz . Быстродействие исследуемого ВИЛ ограничено паразитной частотой отсечки и тепловыми эффектами. С другой стороны, анализ частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-сигнала (параметр S_{11}) в рамках эквивалентной электрической модели лазера показал, что основной вклад вносят емкость контактных площадок и емкость первой мезы лазера в области пространственного заряда, расположенной вблизи обратно смещенного перехода вне области ТП. С другой стороны, низкое значение D -фактора обуславливает быстрое насыщение резонансной частоты с током накачки вследствие саморазогрева лазера. Таким образом, дальнейшее повышение частоты эффективной модуляции может быть достигнуто за счет применения КЯ с большим механическим напряжением [13] (для обеспечения более высокого дифференциального усиления), уменьшения диаметра апертуры ТП [14] (для обеспечения меньшего объема оптической моды) и минимизации площади первой мезы с ТП (для обеспечения меньшей емкости лазера).

В заключение отметим, что исследованные $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ВИЛ, полученные методом спекания гетероструктур активной области на основе тонких КЯ InGaAs и РБО, выращенных методом МПЭ, имеют меньшие пороговые токи и демонстрируют более высокую выходную оптическую мощность при меньших токах накачки по сравнению с $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ВИЛ, полученными методом спекания пластин, выращенных с применением МОГФЭ с активной областью на основе толстых КЯ InAlGaAs, с аналогичной величиной отражения верхнего РБО [4]. Достигнутые высокие значения выходной мощности и модуляционных характеристик исследуемых $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ВИЛ свидетельствуют о перспективности их использования в DWDM-системах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ НШ-6831.2016.8), а также гранта Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности.

Список литературы

- [1] Haglund E., Kumari S., Haglund E. et al. // IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. 2017. V. 23. P. 1.
- [2] Spiga S., Schoke D., Andrejew A. et al. // Proc. Optical Fiber Communication Conf. Optical Society of America, 2016. P. Tu3D. 4.
- [3] Caliman A., Sirbu A., Iakovlev V. et al. // Proc. Optical Fiber Communication Conf. Optical Society of America, 2016. P. Tu3D. 1.
- [4] Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22, P. 32180.
- [5] Mereuta A., Caliman A., Sirbu A. et al. // Proc. of SPIE. 2017. V. 10017. P. 1001702.
- [6] Kuchta D., Huynh T., Doany F. et al. // J. Lightwave Technol. 2016. V. 34. P. 3275.
- [7] Spiga S., Andrejew A., Boehm G., Amann M.C. Single-mode 1.5 μm VCSELs with small-signal bandwidth beyond 20 GHz // 18th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON. Trento, 2016. P. 1.
- [8] Datasheet. 1751A 1550 nm DWDM DFB Laser Module. Alhambra, CA, USA [онлайн]. Доступно: <http://emcore.com/wp-content/uploads/2016/03/1751A.pdf>
- [9] Datasheet. 1550 nm 2.5 Gbit/s Directly Modulated DFB Laser Module. Bozeman, MT, USA [онлайн]. Доступно: http://www.laserdiodesource.com/pdfs/product-1654/1527nm_1610nm_10mW_butterflyDWDM_Fitel-1417226299.pdf
- [10] Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Колодезный Е.С. и др. // ФТП. 2016. Т. 50. С. 1412.
- [11] Babichev A.V., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I. et al. // Proc. of SPIE. 2017. V. 10122. P. 1012208.
- [12] Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A. et al. // IEEE J. Selected Topics. Quantum Electron. 2015. V. 21. P. 414.
- [13] Spiga S., Schoke D., Andrejew A. et al. // J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. P. 3130.
- [14] Spiga S., Schoke D., Andrejew A. et al. // Enhancing the small-signal bandwidth of single-mode 1.5 μm VCSELs. // IEEE Optical Interconnects Conf. San Diego, 2016. P. 14.