

09

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

© А.В. Бабичев<sup>1,2</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1,2,3</sup>, И.И. Новиков<sup>1,2,3</sup>,  
А.Г. Гладышев<sup>1,2</sup>, С.А. Блохин<sup>3</sup>, S. Mikhailov<sup>4</sup>, V. Iakovlev<sup>4</sup>,  
A. Sirbu<sup>4</sup>, G. Stepniak<sup>5</sup>, L. Chorchos<sup>5</sup>, J.P. Turkiewicz<sup>5</sup>,  
К.О. Воропаев<sup>6,7</sup>, А.С. Ионов<sup>6</sup>, М. Agustin<sup>8</sup>, N.N. Ledentsov<sup>8</sup>,  
А.Ю. Егоров<sup>2,¶</sup>

<sup>1</sup> ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> RTI-Research SA, Yverdon-les-Bains, Switzerland

<sup>5</sup> Warsaw University of Technology, Institute of Telecommunications, Warsaw, Poland

<sup>6</sup> ОАО „ОКБ-Планета“, Великий Новгород, Россия

<sup>7</sup> Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

<sup>8</sup> 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 mA, выходной оптической мощностью 6 mW и КПД около 22%. Одномодовый режим генерации с коэффициентом подавления боковых мод в диапазоне значений 40–45 dB сохраняется во всем диапазоне рабочих токов. Частота эффективной модуляции лазеров достигает 9 GHz, ограничена низкой паразитной частотой отсечки и саморазогревом.

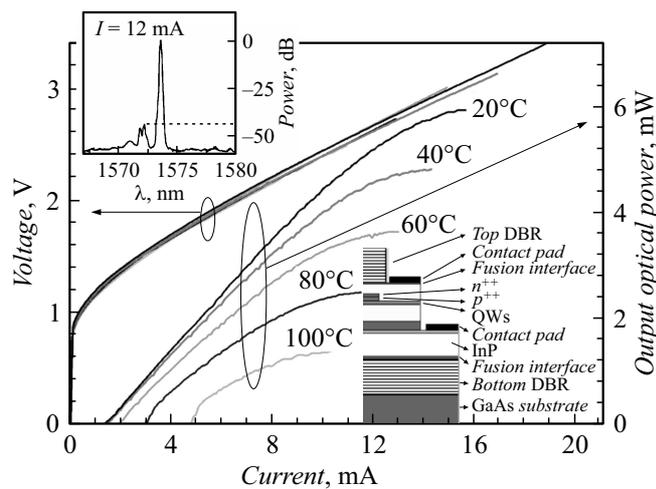
DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45431.16993

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  $1.55\ \mu\text{m}$  демонстрируют более низкую потребляемую мощность и меньшие оптические потери в кремниевом оптоволокне волноводах. Существует две основные технологии формирования высокоэффективных ВИЛ спектрального диапазона  $1.55\ \mu\text{m}$ . 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  $1.55\ \mu\text{m}$ , 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  $1.55\ \mu\text{m}$ , 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  $1.55\ \mu\text{m}$ , 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 внутррезонаторные 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<sup>++</sup>* — 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<sup>++</sup>* — 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.

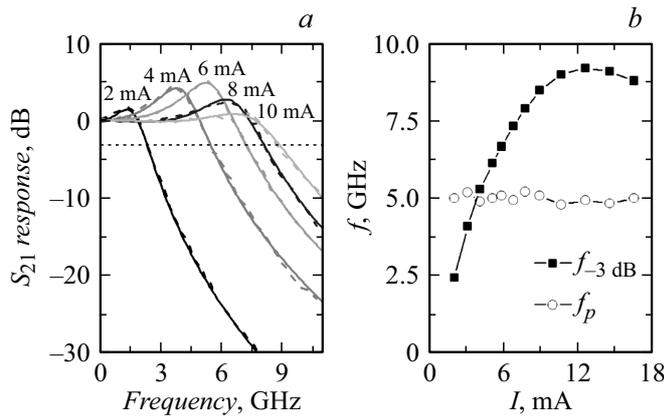
тор Оптикс“ на промышленной установке Riber 49. Активная область, выращенная на подложке InP, состоит из семи квантовых ям (КЯ)  $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$  толщиной 2.8 nm [10,11] с величиной упругих механических напряжений 1.4%, разделенных механически-ненапряженными барьерными слоями  $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.27}\text{As}$  толщиной 12 nm. Спектр фотолюминесценции активной области, измеренный при комнатной температуре, демонстрирует пик вблизи 1510 nm. Слои *p<sup>++</sup>* и *n<sup>++</sup>* 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  $2.5\lambda$ , 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 нм. 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 нм 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 мА, 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  $\mu\text{m}$  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 мА.

На верхней вставке к рис. 1 приведен спектр лазерной генерации, измеренный при 20°C и токе накачки 12 мА. 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  $\mu\text{m}$  ВИЛ на основе конструкции короткого оптического резонатора с ЗТП и диэлектрическими РБО демонстрируют одномодовый режим генерации лишь при апертурах ЗТП менее 5  $\mu\text{m}$ , 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-

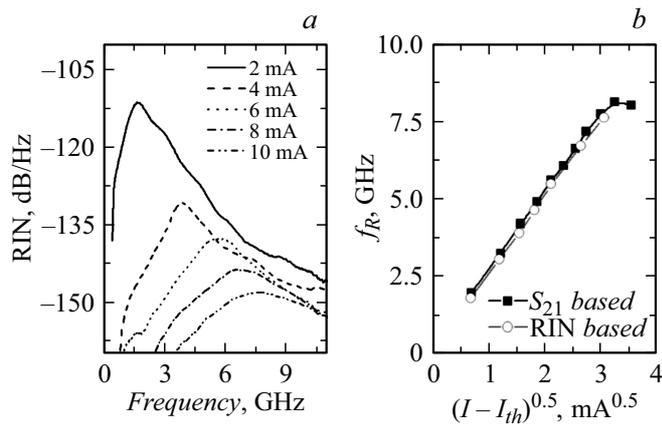


**Рис. 2.** *a* — частотные зависимости  $S_{21}$ , соответствующие различным токам накачки. Штриховые пунктирные линии — экспериментальные кривые, сплошные — результат аппроксимации. *b* — зависимости максимальной частоты эффективной модуляции  $f_{-3\text{ dB}}$  (по уровню спада АЧХ на  $-3\text{ dB}$ ) 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,  $\gamma$  — 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  $-3\text{ dB}$ ) 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  $0.27\text{ ns}$ .

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  $13\text{ GHz}$ . 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  $30\text{ GHz}$ . 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 обратного 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  $\mu\text{m}$  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. Buzeman, MT, USA [онлайн]. Доступно: [http://www.laserdiodesource.com/pdfs/product-1654/1527nm\\_1610nm\\_10mW\\_butterflyDWDM\\_Fitel-1417226299.pdf](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  $\mu\text{m}$  VCSELs. // IEEE Optical Interconnects Conf. San Diego, 2016. P. 14.