

09

## Дизайн и новая функциональность антиволноводных вертикально-излучающих лазеров на длину волны 850 nm

© Н.Н. Леденцов<sup>1,2,3</sup>, В.А. Щукин<sup>1,2</sup>, V.P. Kalosha<sup>1</sup>,  
N.N. Ledentsov, Jr.<sup>1</sup>, J.R. Kropp<sup>1</sup>, M. Agustin<sup>1</sup>,  
С.А. Блохин<sup>2</sup>, А.А. Блохин<sup>2</sup>, М.А. Бобров<sup>2</sup>,  
М.М. Кулагина<sup>2</sup>, Ю.М. Задиранов<sup>2</sup>, Н.А. Малеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VI Systems GmbH, Berlin, Germany

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский академический университет —  
Научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: Nikolay.Ledentsov@v-i-systems.com

Поступило в Редакцию 29 августа 2017 г.

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) с апертурой, ограниченной оксидом, и резонансной полостью на основе GaAlAs с высоким содержанием Al позволяют получить максимальный коэффициент оптического ограничения моды („ $\lambda/2$  дизайн“) и подавить оптическую мощность за пределами апертуры. ВИЛ с двумя связанными полостями дает возможность дополнительно резко усилить потери латеральных мод высокого порядка на утекание в оксидированную область и получить одномодовую лазерную генерацию для диаметров апертуры до 5  $\mu\text{m}$ . Одномодовые антиволноводные ВИЛ позволяют осуществить сверхбыструю передачу данных со скоростью до 160 Gbit/s. Структура, в которой активная среда помещена в нижний распределенный брэгговский отражатель (РБО), а полость и верхний РБО диэлектрические, позволяет снизить в 2 раза температурный сдвиг длины волны излучения (до  $\sim 0.03 \text{ nm/K}$ .)

DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45434.17017

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ), или vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) в англоязычной литературе, широко применяются в сверхскоростной передаче данных по многомодовому опти-

ческому волокну в информационно-вычислительных системах. Чтобы соответствовать постоянно растущей производительности процессоров, скорость передачи данных на канал должна удваиваться каждые 2 года. Скорость передачи данных на плате (on-board signaling rate) в настоящее время достигла 56 Gbit/s; разрабатывается стандарт 112 Gbit/s. При таких скоростях медные межсоединения становятся энергозатратными и дорогими и должны заменяться на оптические, даже для сверхмалых расстояний. Традиционный скептицизм по поводу возможности надежной работы ВИЛ на скоростях, существенно бóльших 10 Gbit/s [1], был связан с негативным опытом применения традиционных ВИЛ на основе GaAs–GaAlAs с волноводной полостью, обогащенной по GaAs [2]. Концепция антиволноводного ВИЛ (antiwaveguiding VCSEL, A-VCSEL) [3], целью которой является увеличение силы осциллятора вертикальной оптической моды [4] и подавление нежелательного излучения в плоскости  $p$ – $n$ -перехода, позволяет осуществлять скоростную передачу вплоть до высоких температур [5] и достигать высокой надежности (reliability) прибора [6]. В последнее время сильно возрос интерес к одномодовым ВИЛ, позволяющим передавать данные на дальние расстояния по многомодовому оптоволокну за счет кардинального уменьшения хроматической дисперсии. Чтобы реализовать одномодовую генерацию в ВИЛ, был предложен подход, основанный на эффекте латерального утекания (leakage) оптических мод в оксидированную область [7,8]. Одномодовая генерация была реализована в ВИЛ с диаметром апертуры  $\sim 5 \mu\text{m}$  [8]. С использованием одномодовых ВИЛ была осуществлена безошибочная передача данных со скоростью 54 Gbit/s в формате NRZ (non return to zero) на расстояние 2.2 km [9]. В формате DMT (discrete multitone) продемонстрирована передача данных со скоростью свыше 160 Gbit/s [10].

Для увеличения ширины пропускания многомодового волокна используется спектральное уплотнение каналов (wavelength division multiplexing), где ключевую роль играет сдвиг длины волны излучения с температурой  $\sim 0.06 \text{ nm/K}$  для типичных ВИЛ диапазона 840–860 nm. Для уменьшения сдвига и создания возможности большего уплотнения каналов в том же спектральном диапазоне (850–950 nm) была предложена концепция вертикально-излучающего лазера с пассивной полостью (passive-cavity surface-emitting laser) [7,11].

В настоящей работе продемонстрировано, как новые концепции эпитаксиальных дизайнов приводят к созданию ВИЛ с новой функциональностью, и дано экспериментальное подтверждение этих подходов.

На рис. 1 сравниваются традиционный дизайн ВИЛ с волноводной  $1\lambda$ -полостью и дизайн с антиволноводной  $\lambda/2$ -полостью. Серым цветом показаны слои  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  с высоким содержанием Al ( $> 95\%$ ), которые после оксидирования превращаются в апертурные слои, где полупроводник окружен оксидом  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_y$ . Свойства дизайнов показаны в одномерном приближении, для области апертуры и для оксидированной области отдельно приведены вертикальные профили показателя преломления и оптических мод.

В волноводном дизайне активная область (active region, AR) помещена в центр  $1\lambda$ -полости, показатель преломления которой больше, чем средний показатель преломления распределенного брэгговского отражателя (РБО) (distributed Bragg reflector, DBR). Такая полость представляет собой волновод для моды, распространяющейся в плоскости слоев. Поэтому для такого дизайна наряду с вертикальной модой ВИЛ возникает волноводная мода (штриховая линия). При этом ее фактор оптического ограничения (гамма-фактор) выше, чем у вертикальной моды ВИЛ.

В антиволноводном дизайне показатель преломления полости меньше, чем среднее значение в РБО, что на практике реализуется слоями  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  с высоким содержанием Al (например, 90%). В антиволноводном  $\lambda/2$ -дизайне достигается максимальный гамма-фактор вертикальной моды ВИЛ и подавляются волноводные моды. В результате подавления волноводной моды, а следовательно, и спонтанного излучения в плоскости слоев в дефектной области под слоями оксидов и на границах мезы ВИЛ не происходит фотовозбуждения неравновесных носителей, которые могли бы вызвать формирование дислокаций, их быстрый рост и соответственно деградацию прибора.

На рис. 2, *a–e* продемонстрированы концепция и реализация одномодового ВИЛ, основанная на утекании латеральных мод высокого порядка в оксидированную область. Дизайн (рис. 2, *a*) содержит наряду с активной полостью также вторую полость, имеющую резонанс на большей длине волны. Взаимодействие двух полостей проиллюстрировано в одномерном приближении на рис. 2, *b*. Каждая полость создает сплошной спектр наклонных (tilted) мод, длина волны которых убывает с углом отклонения от вертикальной оси. Для вертикальной моды в

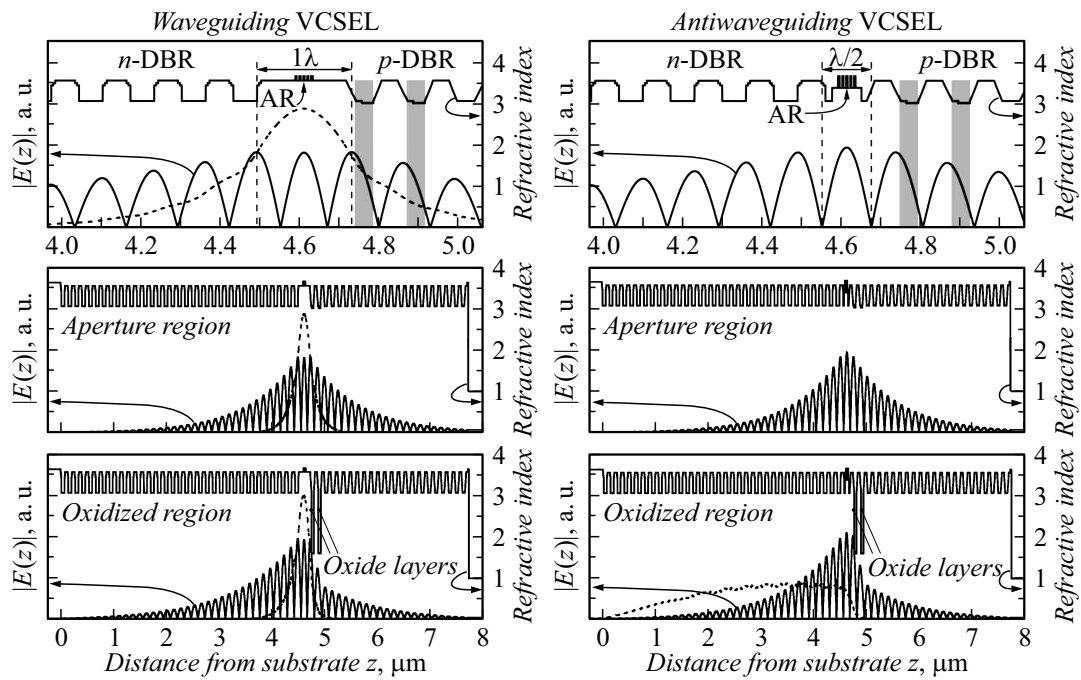
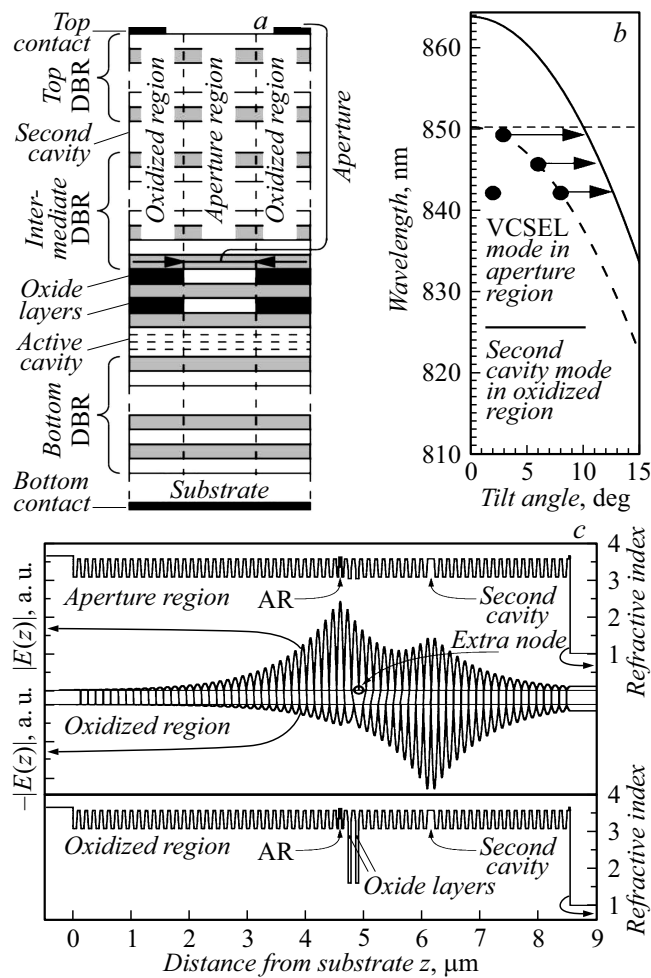


Рис. 1. Сравнение волноводного и антиволноводного дизайнов ВЛ.



**Рис. 2.** Одномодовый ВИЛ на основе селекции оптических мод по латеральному утеканию. *a* — схема ВИЛ с двумя связанными полостями, *b* — спектры наклонных мод в области апертуры и в оксидированной области, *c* — перекрытие полей вертикальной моды ВИЛ в области апертуры и моды второй полости в оксидированной области, *d* — влиние тока на профили фундаментальной моды  $LP_{01}$  и моды высокого порядка  $LP_{11}$ , *e* — спектры излучения одномодового и традиционного ВИЛ.

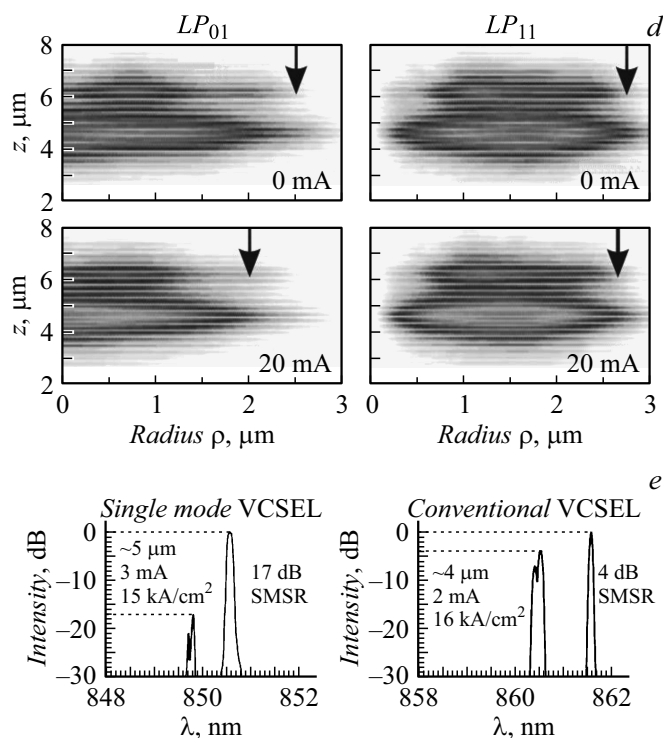


Рис. 2 (продолжение).

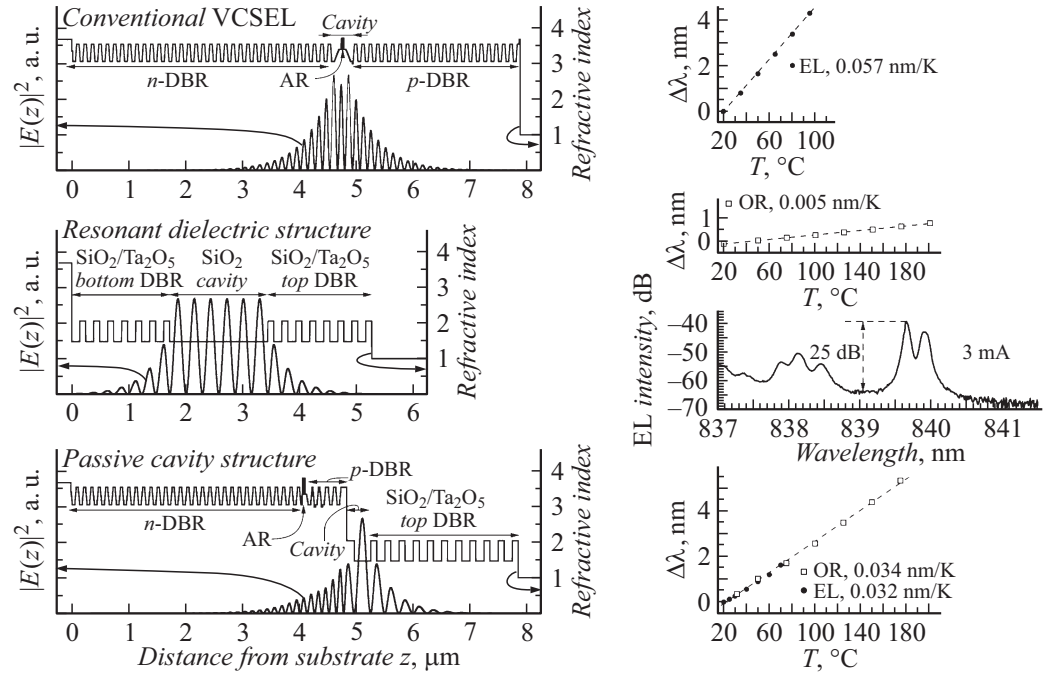
области апертуры (штриховая линия) эти наклонные моды являются аналогом латеральных мод прибора, вычисляемых в точной трехмерной (3D) модели. Длины волн этих мод попадают в сплошной спектр (показано стрелками) наклонных мод второй полости, существующих в оксидированной области, что создает возможность латерального утекания мод. На рис. 2, *c* показано, что вертикальные профили этих двух мод действительно имеют ненулевое перекрытие. Сильное уменьшение показателя преломления в оксидных слоях приводит для моды второй полости к сильной концентрации мощности во второй полости. Поскольку вертикальная мода ВИЛ в области апертуры и мода второй полости в оксидированной области определены для различных верти-

кальных профилей показателя преломления, эти две моды, несмотря на то что число нулей в них отличается на единицу, имеют ненулевой интеграл перекрытия, что является еще одним необходимым условием латерального утекания.

3D-моделирование в цилиндрической геометрии в приближении линейно-поляризованных мод (рис. 2, *d*) показывает, что фундаментальная латеральная мода  $LP_{01}$  сконцентрирована вблизи оси структуры, в то время как моды высокого порядка (для примера показана мода  $LP_{11}$ ) смещены к оксидным слоям и должны сильнее утекать в оксидированную область. Так, расчет времени жизни моды показывает преимущество моды  $LP_{01}$  [8,12]. Учет разогрева структуры, во-первых, за счет джоулева тепла и, во-вторых, за счет инфракрасного поглощения оптической моды на свободных носителях [12] показывает, что в центре структуры вблизи оси возникает тепловая линза с увеличенным показателем преломления. Эта линза практически не воздействует на моду  $LP_{11}$ , расположенную в основном вне линзы, и усиливает локализацию моды  $LP_{01}$  вблизи оси. Стрелки показывают сильное уменьшение латеральной протяженности моды  $LP_{01}$  во второй полости, что усиливает преимущество фундаментальной моды по времени жизни при увеличении тока через прибор.

Спектр лазерного излучения одномодового ВИЛ (рис. 2, *e*) показывает коэффициент подавления боковых мод (side mode suppression ratio, SMSR), равный 17 dB при диаметре апертуры  $5\ \mu\text{m}$  и плотности тока  $15\ \text{kA}/\text{cm}^2$ , что кардинально отличается от данных для спектра традиционного ВИЛ и подтверждает концепцию одномодовых ВИЛ, основанных на латеральном утекании мод.

Температурный сдвиг длины волны излучения в ВИЛ обусловлен зависимостью от температуры показателей преломления слоев полости и РБО. На рис. 3 показаны профили показателя преломления и вертикальной оптической моды, а также измеренные сдвиги с температурой длины волны резонансного минимума в спектре оптического отражения (optical reflectance, OR) и/или максимума электролюминесценции (ЭЛ) (electroluminescence, EL) для трех структур. В традиционном ВИЛ сдвиг длины волны приблизительно равен  $0.057\ \text{nm}/\text{K}$ , что связано с температурной зависимостью показателей преломления  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ . Для диэлектрической структуры на основе  $3\lambda$ -полости  $\text{SiO}_2$  и РБО  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  сдвиг резонансного минимума на порядок меньше:  $0.005\ \text{nm}/\text{K}$ . Для структуры, в которой активная область помещена в



**Рис. 3.** Управление температурным сдвигом длины волны излучения ВИЛ с помощью структуры с пассивной диэлектрической полостью. Для структуры с пассивной полостью представлен также спектр электролюминесценции.



нижний, полупроводниковый РБО, а полость и верхний РБО диэлектрические, сдвиг, измеренный как по спектрам ЭЛ, так и по спектрам отражения, принимает промежуточное значение (0.032–0.034 nm/K) и оказывается в  $\sim 2$  раза меньше, чем для традиционного ВИЛ, что позволяет практически удвоить число каналов в том же спектральном диапазоне.

Отметим, что смещение активной области из полости в РБО уменьшает гамма-фактор вертикальной оптической моды в  $\sim 3$  раза. Несмотря на это, структура вертикального лазера с пассивной полостью, целиком основанная на полупроводниковых материалах, показала лазерную генерацию [11]. Для структуры с диэлектрической полостью и апертурой диаметром  $\sim 3 \mu\text{m}$  в спектрах ЭЛ наряду с длинноволновым пиком, соответствующим фундаментальной моде (расщеплен по поляризации), наблюдаются более коротковолновые пики от мод высокого порядка (рис. 3). Спектральное расстояние между пиками  $\sim 1.7 \text{ nm}$  отвечает межмодовому расстоянию в ВИЛ с данным диаметром апертуры [12]. Интенсивность основного пика ЭЛ растет сверхлинейно с ростом тока накачки, и линия заужается, приводя к подавлению интенсивности сигнала на уровне фона ЭЛ (от 16 dB при 1 mA до 25 dB при 3 mA). Данные свидетельствуют о наличии стимулированного излучения или лазерной генерации в структуре. Дальнейшая оптимизация необходима для получения лазерной генерации с существенной мощностью.

Таким образом, новые подходы к эпитаксиальному дизайну ВИЛ действительно позволяют получать приборы с новой функциональностью: антиволноводный ВИЛ с более высоким быстродействием и надежностью, одномодовые ВИЛ с большими диаметрами апертуры, а также лазеры, температурно-стабилизированные по длине волны излучения.

## Список литературы

- [1] Iga K. // IEEE J. Selected Topics Quant. Electron. 2000. V. 6. Iss. 6. P. 1201–1215.
- [2] Chang-Hasnain C.J., Harbison J.P., Hasnain G. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1991. V. 27. Iss. 6. P. 1402–1409.
- [3] Ledentsov N., Shchukin V. US Patent 7,339,965. Grant date: March 4. 2008. Filed date: April 5, 2005.

- [4] *Ledentsov N.N., Kropp J.-R., Shchukin V.A.* et al. // Proc. SPIE. 2015. V. 9381. P. 93810F.
- [5] *Mutig A., Fiol G., Moser P.* et al. // Electron. Lett. 2008. V. 44. Iss. 22. P. 1305–1306.
- [6] *Kropp J.-R., Steinle G., Schäfer G.* et al. // Semicond. Sci. Technol. 2015. V. 30. P. 045001.
- [7] *Ledentsov N.N., Shchukin V.A., Lott J.A.* // Future trends in microelectronics: Into the cross currents / Eds S. Luryi, J. Xu, A. Zaslavsky. John Wiley & Sons, 2013. P. 142–159.
- [8] *Shchukin V., Ledentsov N.N., Kropp J.* et al. // IEEE J. Quant. Electron. 2014. V. 50. Iss. 12. P. 990–995.
- [9] *Stepniak G., Lewandowski A., Kropp J.-R.* et al. // Electron. Lett. 2016. V. 52. Iss. 8. P. 633–635.
- [10] *Kottke C., Caspar C., Jungnickel V.* et al. // Optical Fiber Communication Conf. OSA Technical Digest (online). Optical Society of America, 2017. P. W41.7.
- [11] *Lott J.A., Shchukin V.A., Ledentsov N.N.* et al. // Electron. Lett. 2011. V. 47. Iss. 12. P. 717–718.
- [12] *Kalosha V.P., Shchukin V.A., Ledentsov N.N., Jr.* et al. // Proc. SPIE. 2017. V. 10122. P. 101220K-1.