

## Матрицы вертикально излучающих лазеров спектрального диапазона 960 нм

© Н.А. Малеев<sup>1,2,\*</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>2,1</sup>, А.С. Шуленков<sup>3</sup>, С.А. Блохин<sup>1,2</sup>, М.М. Кулагина<sup>1</sup>, Ю.М. Задиранов<sup>1</sup>, В.Г. Тихомиров<sup>4</sup>, А.Г. Гладышев<sup>2</sup>, А.М. Надточий<sup>1</sup>, Е.В. Никитина<sup>5</sup>, J.A. Lott<sup>6</sup>, В.Н. Сведе-Швец<sup>7</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>6,1</sup>, В.М. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО „Коннектор Оптик“, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Минский НИИ Радиоматериалов, 220024 Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup> СПбГЭТУ ЛЭТИ, 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>6</sup> VI Systems GmbH, D-10623 Berlin, Germany

<sup>7</sup> ООО „ОЭС“, 105318 Москва, Россия

(Получена 20 декабря 2010 г. Принята к печати 27 декабря 2010 г.)

Реализованы матрицы вертикально-излучающих лазеров с индивидуальной адресацией элементов и выводом излучения через подложку арсенида галлия. Индивидуальные лазерные излучатели с диаметром токовой апертуры 6–7 мкм демонстрируют лазерную генерацию на длине волны 958–962 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.1–1.3 мА, дифференциальной эффективностью 0.5–0.8 мВт/мА и максимальной выходной мощностью 7.5–9 мВт. Разброс параметров индивидуальных излучателей в пределах матричного кристалла, содержащего  $5 \times 7$  элементов, не превышает  $\pm 20\%$ .

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) находят широкое применение в быстродействующих системах волоконно-оптической связи и различных оптических сенсорах [1]. Уникальные характеристики ВИЛ (малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, низкие рабочие токи, групповая технология изготовления, позволяющая формировать линейные массивы и двумерные матрицы с большим числом индивидуально адресуемых излучателей, возможность тестирования приборов непосредственно на пластине до разделения на кристаллы) определяют перспективы широкого использования локальных оптических каналов передачи информации на основе ВИЛ в современных суперкомпьютерах, центрах обработки данных и сложных комплексах бортовой аппаратуры [2]. Дальнейшее развитие внутрисистемных информационных каналов, а также создание оптических систем передачи данных в свободном пространстве требуют перехода от использования дискретных ВИЛ к линейным массивам или матрицам с индивидуальной адресацией отдельных излучателей [3].

Практический интерес представляет реализация матричных излучателей, содержащих достаточно мощные ВИЛ в конструктивном исполнении, потенциально при-

годном для получения высокого быстродействия. Факторы, лимитирующие быстродействие ВИЛ, сильно взаимосвязаны между собой [4,5]. На практике приходится решать систему взаимосвязанных задач:

- увеличение дифференциального усиления активной среды;
- снижение уровня внутренних оптических потерь;
- повышение выходной оптической мощности;
- уменьшение последовательного электрического и теплового сопротивлений;
- минимизация паразитной емкости лазера.

При создании матричных излучателей дополнительно приходится принимать во внимание возможность обеспечения группового монтажа индивидуальных излучающих элементов. Кроме того, переход от индивидуальных ВИЛ к массивам лазерных излучателей требует специальных усилий по решению проблемы существенного тепловыделения при одновременной работе большого количества излучателей. Недавно опубликованы результаты создания массива быстродействующих ВИЛ, содержащего 28 индивидуальных излучателей с диаметром токовой апертуры 18 мкм, обеспечивающего суммарную выходную мощность 120 мВт при частотной полосе токовой модуляции 7.5 ГГц [6]. В данном случае в конструкции прибора использовалась проводящая подложка GaAs, что ограничивает возможности существенного расширения частотного диапазона.

\* E-mail: Maleev@beam.ioffe.ru

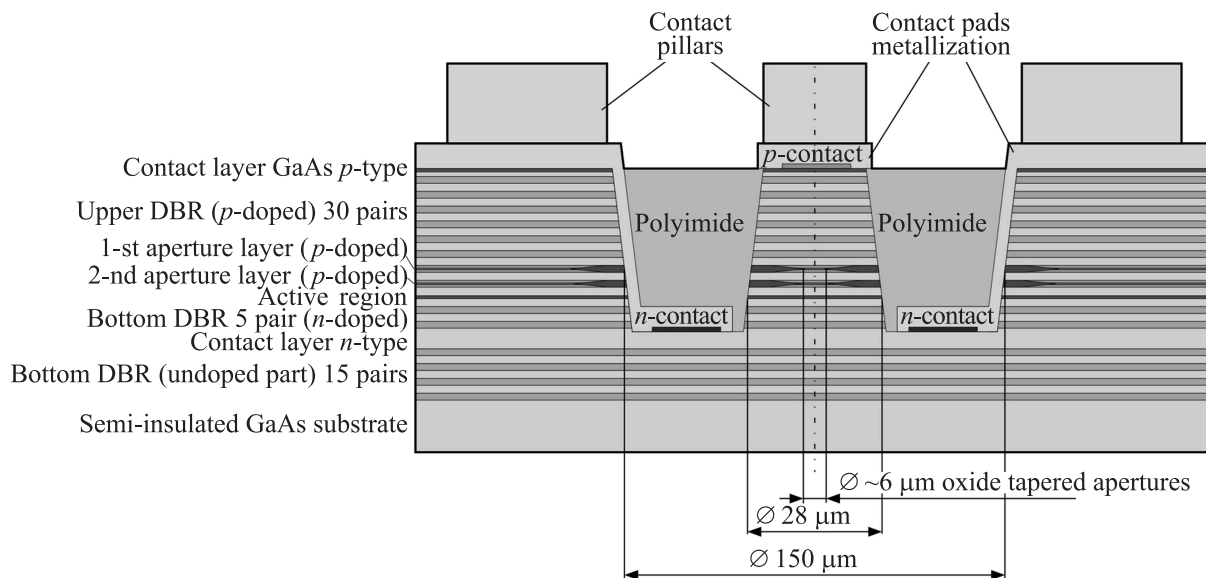
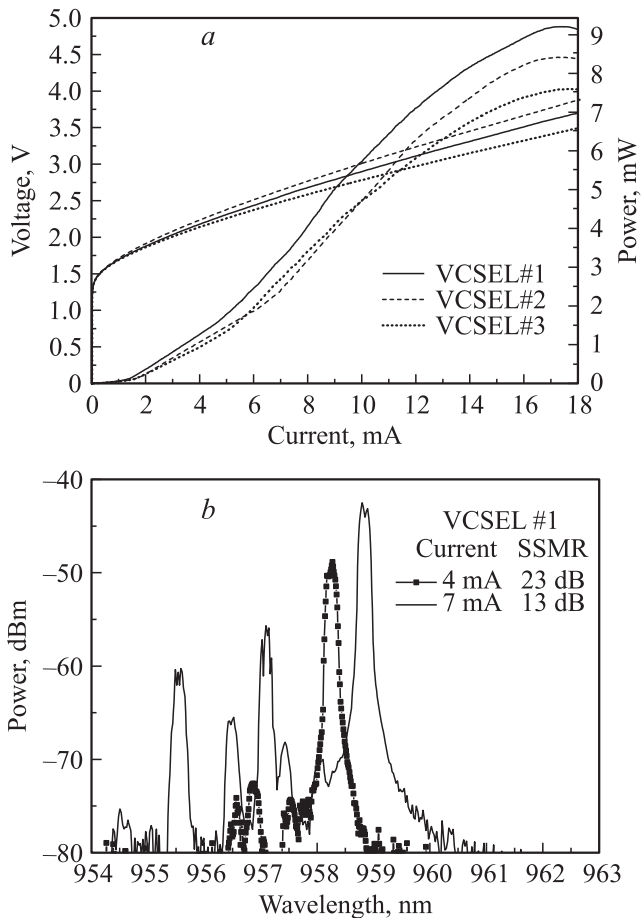


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение конструкции индивидуального элемента матричного лазерного излучателя

В данной работе для реализации матричных излучателей использовалась конструкция эпитаксиальной структуры ВИЛ, с двумя селективно-окисленными апертурными слоями специальной формы, ранее использованная для получения дискретных пространственно-одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 960 нм с рекордным уровнем выходной мощности 15 мВт [7]. При этом конструкция индивидуальных ВИЛ и технология изготовления приборов были оптимизированы применительно к задаче получения однородного массива лазерных излучателей, обеспечивающих выходную мощность индивидуального излучателя на уровне 2–3 мВт при сравнительно небольших рабочих токах (не более 8–10 мА), потенциально пригодного для группового монтажа методом „перевернутого кристалла“. Схематическое сечение конструкции индивидуального излучающего элемента приведено на рис. 1. Верхний легированный углеродом РБО сформирован из чередующихся слоев  $p\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  и  $p\text{-GaAs}$  с градиентным изменением состава на границах. Активная область состоит из пяти  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  ( $x \approx 0.2$ ) квантовых ям толщиной 4 нм, разделенных барьерными слоями  $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$  ( $y \approx 0.92$ ) толщиной 6 нм. Благодаря частичной компенсации возникающих механических напряжений такая конструкция активной области позволяет использовать сильно напряженные квантовые ямы, обладающие большим дифференциальным усилением. Нижний РБО, через который осуществляется вывод излучения, состоит из непосредственно примыкающих к активной области 5 пар легированных кремнием слоев  $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  и  $n\text{-GaAs}$  с градиентным изменением состава на границах, скрытого контактного слоя  $n\text{-GaAs}$  и 15 пар нелегированных четвертьволновых слоев  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  и  $\text{GaAs}$ . Эпитаксиальные гетероструктуры выращивались методом газофазной эпитаксии из паров металлорганических соединений

на полуизолирующих подложках арсенида галлия. Использование полуизолирующей подложки принципиально важно для реализации быстродействующих приборов, поскольку позволяет минимизировать величины паразитных емкостей. Неоднородный профиль легирования скрытого контактного слоя  $n\text{-GaAs}$  обеспечивает низкие значения контактного сопротивления и сопротивления растекания при сохранении низких внутренних оптических потерь. В сочетании с относительно небольшим числом пар четвертьволновых слоев между контактным слоем и активной областью прибора это обеспечивает снижение последовательного сопротивления. Анодные контактные площадки индивидуальных элементов матричных излучателей расположены непосредственно над излучающей областью, а металлизация контактов к слою  $n\text{-GaAs}$  выведена на один уровень с металлизацией  $p$ -контактов. Расположение контактных площадок на одном уровне со стороны, противоположной направлению вывода излучения, делает конструкцию пригодной для монтажа методом перевернутого кристалла.

Технологический процесс изготовления матричных излучателей основан на разработанных ранее процессах сухого травления пучком  $\text{Ag}$  под маской фоторезиста и селективного окисления апертурных слоев  $\text{AlGaAs}$  [8]. Изготовление приборов начиналось с формирования металлизации  $p$ -контактов. После травления мезаструктуры до активной области и селективного окисления апертурных слоев производилось второе сухое травление для вскрытия контактного слоя  $n\text{-GaAs}$  и формирование металлизации  $n$ -контактов. После этого осуществлялись пассивация приборной структуры слоем  $\text{SiO}_2$ , вскрытие контактных окон, формирование металлизации контактных площадок, планаризация структуры полиимидом и формирование контактных столбиков.



**Рис. 2.** *a* — семейства вольт-амперных и мощностных характеристик для трех индивидуальных ВИЛ, измеренные в пределах одного кристалла матричного излучателя; *b* — спектры лазерной генерации для ВИЛ#1, измеренные при значениях тока накачки 4 и 7 мА.

Вольт-амперные, мощностные и спектральные характеристики изготовленных матриц, содержащих  $5 \times 7$  индивидуально адресуемых ВИЛ, были измерены непосредственно на пластине в непрерывном режиме при комнатной температуре окружающей среды без дополнительного охлаждения. На рис. 2, *a* представлены семейства вольт-амперных и мощностных характеристик для трех индивидуальных лазерных излучателей. ВИЛ с диаметром токовой апертуры около 6 мкм, измеренные в пределах одного кристалла матричного излучателя, демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.15–1.3 мА, дифференциальной эффективностью от 0.4–0.5 мВт/мА вблизи порога генерации до 0.7–0.8 мВт/мА при рабочем токе 10 мА и максимальной выходной мощности от 7.5 до 9 мВт. На рис. 2, *b* приведены спектры излучения одного из индивидуальных ВИЛ, измеренные при нескольких значениях тока накачки. В диапазоне рабочих токов до 7 мА наблюдается квазиодномодовая генерация с фактором подавления

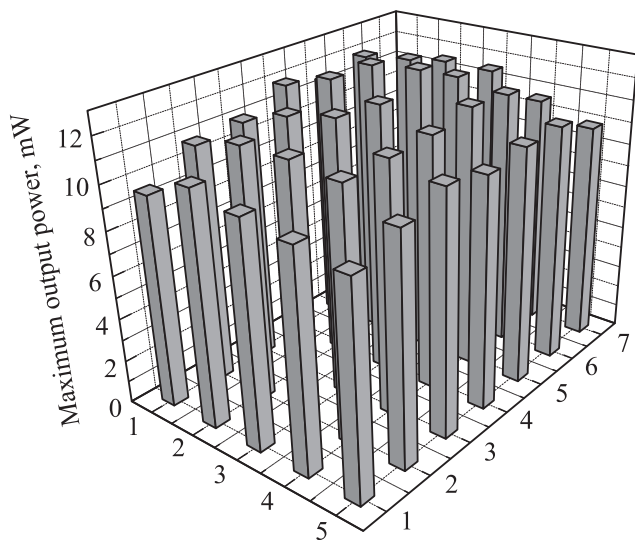
боковых мод (SMSR) более 10 дБ. Значение выходной мощности при токе 7 мА составляет 3 мВт.

Для оценки теплового сопротивления предложенной конструкции индивидуальных излучателей использовалась широко применяемая для ВИЛ методика [9], основанная на измерениях величины смещения спектра выходного излучения от рассеиваемой мощности в непрерывном режиме и от температуры в импульсном режиме. Измеренная величина теплового сопротивления составляет 1100–1300 К/Вт, что существенно меньше типичных значений 2000–2500 К/Вт, измеренных нами для дискретных ВИЛ с аналогичными размерами токовой апертуры, реализованных в классическом варианте конструкции с проводящей подложкой, нижним катодным контактом и выводом излучения через верхнее зеркало. Сравнение результатов численного моделирования распределения тепла для двух конструкций приборов показывает, что существенный вклад в уменьшение теплового сопротивления для используемой в матрице конструкции ВИЛ вносят латеральное растекание тепла по скрытому контактному слою *n*-GaAs и расположенные анодного контакта, присоединенного к теплоотводу, непосредственно над активной областью (в проведенных измерениях роль теплоотвода играл измерительный зонд).

Предложенная конструкция индивидуального излучателя обеспечивает низкие значения паразитных емкостей. Измеренная на частоте 1 МГц величина емкости ВИЛ при нулевом напряжении смещения составляет не более 0.13 пФ. С учетом характерных значений последовательного сопротивления в диапазоне 95–115 Ом оценка величины граничной частоты, лимитированной паразитными элементами эквивалентной схемы, составляет 10–12 ГГц (по уровню спада АЧХ на 3 дБ). С учетом высокой дифференциальной эффективности оптического усиления для используемой активной области и низкого уровня теплового сопротивления можно ожидать высокое быстродействие матричных излучателей. На следующем этапе предполагается выполнить исследования динамических характеристик разработанной матрицы, собранной на измерительную плату.

На рис. 3 представлено распределение максимальной выходной мощности индивидуальных ВИЛ по площади одной из изготовленных матриц, иллюстрирующее степень однородности параметров индивидуальных излучателей в пределах одного кристалла. По сравнению с реализованными ранее матричными излучателями [8], имевшими разброс характеристик излучателей по кристаллу матрицы более 100%, новая технология обеспечивает разброс характеристик индивидуальных ВИЛ не более  $\pm 20\%$ .

Таким образом, в рамках настоящей работы реализованы матрицы вертикально-излучающих лазеров с индивидуальной адресацией элементов и выводом излучения через подложку арсенида галлия. Индивидуальные лазерные излучатели с диаметром токовой апертуры около 6 мкм демонстрируют лазерную генерацию на длине



**Рис. 3.** Распределение максимальной выходной мощности индивидуальных ВИЛ по площади одного из изготовленных матричных излучателей формата  $5 \times 7$ .

волны 958–962 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.15–1.3 мА, дифференциальной эффективностью 0.5–0.8 мВт/мА и максимальной выходной мощностью 7.5–9 мВт. При этом выходная мощность в квазиодномодовом режиме с фактором подавления мод высшего порядка более 10 дБ составляет не менее 3 мВт. Принимая во внимание низкие значения паразитной емкости и теплового сопротивления индивидуальных излучателей, разработанная технология перспективна при создании матричных излучателей для устройств быстродействующих оптической коммутации электронных модулей в перспективных вычислительных системах и реализации оптических систем передачи в свободном пространстве.

Работа выполнялась при частичной поддержке программы № 27 президиума РАН, грантов РФФИ (09-02-00848-а, 09-02-12411-офи\_м), Фонда содействия развитию малых форм предприятий и научно-технической сфере, Федеральной целевой программы „Научные и педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 и Госконтракта 14.740.11.0066.

## Список литературы

- [1] F. Koyama. *J. Lightwave Technology*, **24**, 4502 (2006).
- [2] A. Benner, M. Ignatowski, J.A. Kash, D.M. Kuchta, M.B. Ritter, *IBM J. Resource development*, **49**, 755 (2005).
- [3] M. Gruber. *Appl. Opt.*, **43**, 463 (2004).
- [4] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (N.Y., Wiley, 1995).
- [5] С. Блохин, Л. Карачинский, А. Кузьменков, Н. Малеев. *Фотоника*, **5**, 24 (2010).
- [6] R. Safaisini, J.R. Joseph, G. Dang, K.L. Lear. *Electron. Letters*, **45**, 414 (2009).

- [7] J.A. Lott, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, M.M. Kulagina, Yu.M. Zaderanov, A.G. Gladyshev, A.M. Nadtochiy, E.V. Nikitina, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov. In: *Proceedings 22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference*, Kyoto, Japan, WC6, p. 184 (26–30 September 2010).
- [8] Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.С. Шуленков, С.В. Чумак, Е.В. Никитина, С.А. Блохин, М.М. Кулагина, Е.С. Семенова, Д.А. Лившиц, М.В. Максимов, В.М. Устинов, *ФТП*, **39**, 487 (2005).
- [9] M.H. MacDougal, J. Geske, C.-K. Lin, A.E. Bond, P.D. Dapkus. *IEEE Photonics Techn. Lett.*, **10**, 15 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

## Matrix of 960 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

N.A. Maleev<sup>1,2</sup>, A.G. Kuzmenkov<sup>2,1</sup>, A.S. Shulenkov<sup>3</sup>, S.A. Blokhin<sup>1,2</sup>, M.M. Kulagina<sup>1</sup>, Yu.M. Zadiranov<sup>1</sup>, V.G. Tikhomirov<sup>4</sup>, A.G. Gladyshev<sup>2</sup>, A.M. Nadtochiy<sup>1</sup>, E.V. Nikitina<sup>5</sup>, J.A. Lott<sup>6</sup>, V.N. Svede-Shvets<sup>7</sup>, N.N. Ledentsov<sup>6,1</sup>, V.M. Ustinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Connector Optics LLC, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Minsk Research Institute of Radiomaterials 220024 Minsk, Belorussia

<sup>4</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 197376 St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup> St. Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Center, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia,

<sup>6</sup> VI Systems GmbH, D-10623 Berlin, Germany

<sup>7</sup> OES Ltd, 105318 Moscow, Russia

**Abstract** Laser matrixes of individually addressable bottom-emitting VCSELs on GaAs substrate are realized. Individual emitters with 6–7 micrometers oxidized apertures demonstrate room-temperature continuous wave lasing at 958–962 nm with threshold current of 1.15–1.3 mA, differential efficiency of 0.5–0.8 mW/mA and maximum output power of 7.5–9 mW. The parameters nonuniformity of individual emitters is less than  $\pm 20\%$  for  $5 \times 7$  matrix chip.