

Конструкция и технология изготовления матриц вертикально-излучающих лазеров

© 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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов,
220024 Минск, Белоруссия

(Получена 28 июня 2004 г. Принята к печати 12 июля 2004 г.)

Предложена конструкция и технология изготовления матриц вертикально-излучающих лазеров с нижним полупроводниковым AlGaAs/GaAs и верхним AlGaO/GaAs распределенными брэгговскими отражателями. Реализованы матрицы, содержащие 8×8 лазеров с активной областью на основе двух квантовых ям InGaAs. На индивидуальных излучающих элементах при диаметре окисленной апертуры 8–10 мкм получена лазерная генерация на длинах волн 960–965 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.0–2.5 мА, дифференциальной эффективностью до 0.4 мВт/мА и максимальной выходной мощностью более 2 мВт.

В последние годы полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) находят широкое применение в быстродействующих системах волоконно-оптической связи, оптических сенсорах и устройствах обработки информации [1]. Основные преимущества ВИЛ по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции — малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, групповая технология изготовления и возможность тестирования приборов непосредственно на пластине. Планарная технология ВИЛ позволяет формировать двумерные матрицы с большим числом излучателей индивидуальной адресации. Такие матричные излучатели рассматриваются в качестве наиболее перспективных источников для реализации оптической коммутации электронных модулей в будущих высокопроизводительных вычислительных системах [2], создания оптических векторных процессоров [3] и быстродействующих многоканальных коммутаторов для нейронных сетей [4].

В качестве зеркал ВИЛ, ограничивающих вертикальный микрорезонатор Фабри–Перо, используются распределенные брэгговские отражатели (РБО). Наиболее широко распространена конструкция с легированными полупроводниковыми РБО на основе чередующихся четвертьволновых слоев $Al_xGa_{1-x}As$ различного состава. В таких приборах инжекция носителей заряда в активную область обеспечивается за счет протекания тока непосредственно через зеркала. При этом для пространственного ограничения активной области ВИЛ в латеральном направлении применяются изолирующая имплантация протонов или селективное окисление скрытых слоев AlGaAs (формирование апертуры) [1,5]. Однако реализация легированных РБО с низким сопротивлением требует использования сложных профилей легирования и состава на границах слоев, которые надо

контролировать с высокой точностью [1]. Кроме того, в конструкциях с легированными зеркалами сравнительно трудно получить малые значения паразитной емкости, что может ограничивать частотный диапазон приборов, а большая толщина легированных РБО ухудшает отвод тепла от активной области прибора и усложняет процедуру травления изолирующей мезы.

В последние годы активно разрабатываются конструкции ВИЛ с непроводящими зеркалами, в которых один или оба контакта выполнены к проводящим слоям, непосредственно примыкающим к активной (излучающей) области ВИЛ (intracavity-contacted VCSELs — ICVCSELs) [1,6]. В частности, такой подход был успешно использован при создании ВИЛ с активной областью на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек [7], когда требуется обеспечить минимально возможный уровень оптических потерь в микрорезонаторе. Кроме того, поскольку в данном случае обе контактные площадки располагаются на лицевой стороне структуры, ICVCSELs идеально подходят для монтажа методом перевернутого кристалла (flip-chip) с выводом излучения через подложку, широко используемого при интеграции матричных излучателей на основе ВИЛ и цифровых кремниевых интегральных схем [5]. Однако успешная реализация ВИЛ с непроводящими эпитаксиальными зеркалами возможна только при прецизионном травлении глубоких многоступенчатых меза-структур.

Новой интересной возможностью в технологии ICVCSELs является использование зеркал на основе AlGaO/GaAs, формируемых путем латерально селективного окисления в парах H_2O слоев $Al_xGa_{1-x}As$ с высоким содержанием AlAs x [8]. Значительное различие коэффициентов преломления материалов для РБО с окисленными слоями позволяет обеспечить необходимый уровень отражения в широком диапазоне длин волн при существенно меньшем числе пар четвертьволновых слоев. В то же время необходима тщательная калибровка состава слоев эпитаксиальной структуры

[†] E-mail: maleev@beam.ioffe.rssi.ru

для обеспечения заданных скоростей окисления. Это особенно критично в случае формирования окисленных зеркал и токовых апертур в одном процессе, а также при реализации матриц ВИЛ, когда необходимо обеспечить 100-процентный выход годных приборов в пределах кристалла матрицы. Другая серьезная проблема при конструировании матричных излучателей — обеспечение возможности монтажа методом перевернутого кристалла, для чего желательнее всего выполнить металлизацию всех контактных площадок на одном уровне по высоте. Это обуславливает повышенные требования к механической надежности зеркал с окисленными слоями.

Ранее нами были разработаны дискретные ВИЛ с активной областью на основе квантовых ям (КЯ) InGaAs, нижним полупроводниковым РБО и верхним РБО с окисленными слоями, в которых была реализована лазерная генерация в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 0.5–1.5 мА, дифференциальной эффективностью до 0.5 мВт/мА и максимальной выходной мощностью до 3 мВт [9,10]. В настоящей работе представлены результаты разработки конструкции и технологии изготовления матрицы ВИЛ с непроводящими зеркалами, содержащей 8×8 излучателей индивидуальной адресации.

Предложенная конструкция индивидуального лазерного излучателя для матриц ВИЛ схематически представлена на рис. 1. За основу использован предложенный ранее вариант конструкции ВИЛ с нижним нелегированным полупроводниковым РБО AlGaAs/GaAs и верхним РБО AlGaO/GaAs [9]. Основное отличие по сравнению с дискретным прибором состоит в размещении площадки p -контакта непосредственно на поверхности РБО AlGaO/GaAs над активной областью. В случае монтажа

методом перевернутого кристалла это должно улучшить отвод тепла от активной области ВИЛ. Кроме того, в предложенной конструкции слои металлизации обеих контактных площадок расположены на одном уровне по высоте, что существенно облегчает монтаж методом перевернутого кристалла. В предлагаемой конструкции отсутствует необходимость в травлении третьей (изолирующей) мезы или проведения изолирующей имплантации.

Структуры ВИЛ с активными слоями на основе КЯ InGaAs выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на полуизолирующих подложках GaAs ориентации (001) с использованием лабораторной установки МПЭ Riber 32P. Типичная эпитаксиальная структура состоит из верхнего нелегированного РБО, содержащего 7 пар слоев GaAs/Al_{0.97}Ga_{0.03}As, неоднородно-легированного контактного слоя p -GaAs, верхнего апертурного слоя p -Al_{0.98}Ga_{0.02}As с градиентным изменением состава на границах, нелегированной активной области с 2 КЯ In_{0.15}Ga_{0.85}As в матрице Al_{0.15}Ga_{0.85}As, нижнего апертурного слоя n -Al_{0.98}Ga_{0.02}As с градиентным изменением состава на границах, контактного слоя n -GaAs и нижнего РБО, содержащего 19 пар слоев Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs. Толщины слоев AlGaAs и GaAs в нижнем РБО, апертурных слоев и слоев GaAs в верхнем РБО примерно соответствуют $1/4$ резонансной длины волны λ_{Bragg} вертикального микрорезонатора. Толщины слоев Al_{0.97}Ga_{0.03}As в верхнем РБО выбираются так, чтобы после окисления их толщина соответствовала $1/4\lambda_{\text{Bragg}}$ (с учетом изменения показателя преломления и некоторого механического сжатия слоев после окисления). Полная геометрическая толщина резонатора L_{cav} примерно соответствует $5\lambda_{\text{Bragg}}$. В некоторых структурах между подложкой и нижним полупроводниковым РБО выращивались дополнительные слои Al_{0.9}Ga_{0.1}As и GaAs толщиной $\sim \lambda_{\text{Bragg}}$, используемые в качестве стоп-слоев при химическом травлении сквозных окон в подложке, предназначенных для вывода излучения.

Основной проблемой при эпитаксиальном выращивании структур ВИЛ является необходимость прецизионного (с точностью не хуже 1%) контроля толщины и состава слоев [1]. Использование предварительных калибровок не всегда обеспечивает необходимую точность из-за возможных флуктуаций скоростей роста и положения держателя подложки, особенно при использовании установок МПЭ лабораторного типа. Для воспроизводимого получения заданной резонансной длины волны использовалась предложенная ранее процедура [10], состоящая в прерывании роста после завершения формирования активной области, измерении спектра отражения от частично сформированной эпитаксиальной структуры в высоковакуумной камере установки МПЭ и внесении соответствующих корректировок в режимы выращивания верхнего зеркала.

К числу наиболее критичных операций в технологии ВИЛ относится прецизионное травление многоступенчатых меза-структур и селективное окисление слоев

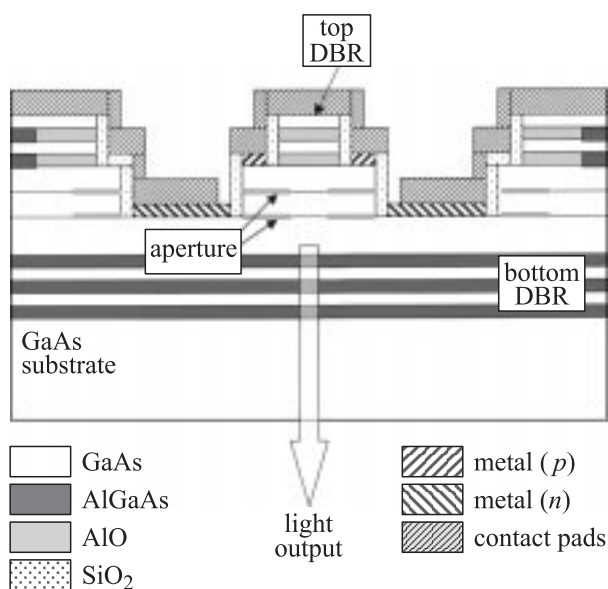


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения индивидуального лазерного излучателя с нижним полупроводниковым РБО и верхним РБО с окисленными слоями, используемого в качестве базового элемента матрицы ВИЛ.

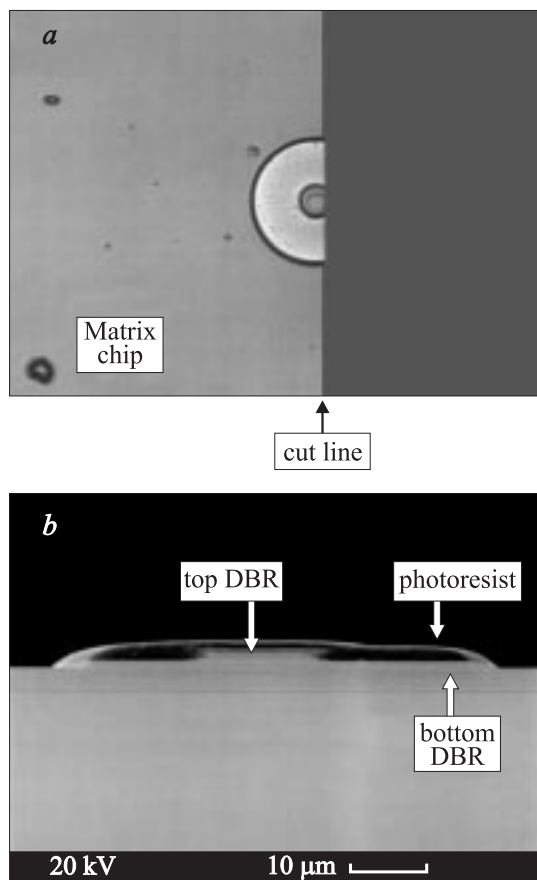


Рис. 2. Структура ВИЛ после формирования двухступенчатой меза-структуры методом сухого травления пучком Ar^+ : *a* — микрофотография поверхности; *b* — СЭМ-изображение поперечного скола.

AlGaAs . В настоящей работе за основу использовалась разработанная ранее методика сухого травления в пучке ионов Ar^+ , позволяющая воспроизводимо получать нужную глубину травления и заданный наклон стенок меза-структур [7,10]. Применительно к технологии матричных излучателей наиболее критичным является формирование устойчивой фоторезисторной маски, обеспечивающей надежное перекрытие непланарного рельефа, который образуется после травления первой мезы. На рис. 2 приведены микрофотографии поверхности и изображение поперечного скола меза-структуры ВИЛ, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), после травления второй мезы. Разработанные процедуры фотолитографии и сухого травления удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Особенность разработанного технологического процесса изготовления матриц ВИЛ состоит в одновременном формировании окисленных апертур и окислении слоев верхнего зеркала. Поскольку диаметр апертуры должен быть существенно меньше, чем размер верхнего зеркала, необходимо тщательное согласование скоростей окисления различных слоев эпитаксиальной структуры. Несогласованность в скоростях окисления

апертурного слоя и верхнего зеркала приводит либо к „схлопыванию“ апертуры (т.е. полной нефункциональности прибора), либо к сильному „переокислению“ верхнего РБО. „Переокисление“ приводит к снижению коэффициента отражения зеркал из-за ухудшения морфологических характеристик, а также понижает механическую стабильность структуры из-за слишком сильного сжатия слоев [11]. Таким образом, разработка технологии матричных излучателей с РБО AlGaO/GaAs возможна только при тщательной комплексной оптимизации конструкции и параметров процесса селективного окисления.

Калибровка процесса селективного окисления проводилась с использованием как специальных тестовых структур, так и реальных структур ВИЛ, позволяющих непосредственно измерить скорости окисления для слоев РБО и апертурных слоев. На рис. 3 приведена микрофотография скола оптимизированной структуры ВИЛ, подвергнутой селективному окислению при температуре 400°C в течение 30 мин. Меза-структура была протравлена с использованием маски в виде полосков шириной 60 мкм. Окисленные слои AlGaAs выглядят как более темные по сравнению с неокисленными. Толщины и состав окисляемых слоев выбраны таким образом, чтобы слои верхнего зеркала окислялись несколько медленнее (в 1.3–1.5 раза), чем апертурные слои. Поскольку в реальном приборе диаметр меза-структуры верхнего зеркала ~ 30 мкм, а диаметр апертурной меза-структуры ~ 55 мкм, выбранное сочетание скоростей окисления обеспечивает надежное завершение окисления верхнего зеркала за время окисления апертур до диаметра 8–10 мкм. Одновременно обеспечивается не слишком большое превышение времени процесса окисления по сравнению с временем полного окисления слоев РБО (для предотвращения „переокисления“). Следует подчеркнуть, что глубина окисления зависит не только от состава слоев AlGaAs , но и от их толщины, что дает дополнительную степень свободы при проектировании эпитаксиальной структуры ВИЛ [8]. В целом оптимизированная технология селективного окисления обес-

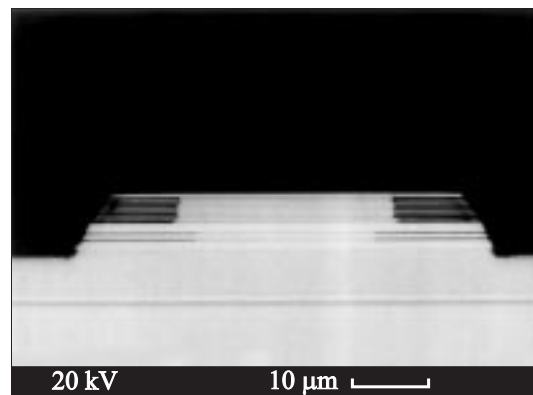


Рис. 3. СЭМ-изображение скола оптимизированной структуры ВИЛ после проведения тестового процесса травления и селективного окислирования.

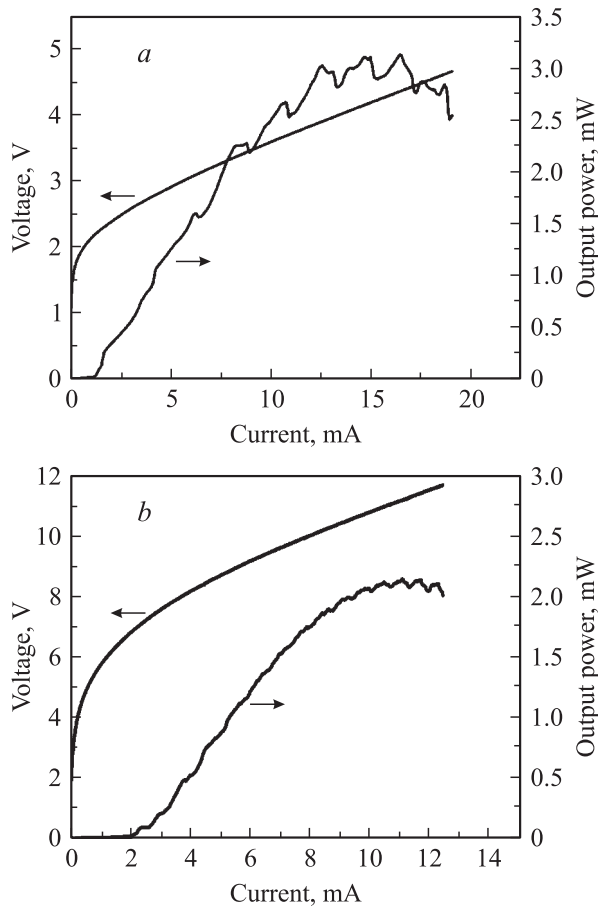


Рис. 4. Вольт-амперные и мощностные характеристики индивидуальных ВИЛ: *a* — нормальный прибор, соответствующий проектным требованиям; *b* — прибор с повышенным последовательным сопротивлением.

печивает достаточную воспроизводимость параметров процесса и механическую стабильность структур ВИЛ.

После травления мез и селективного окисления производилась пассивация приборной структуры слоем SiO_2 толщиной 0,2 мкм, вскрытие контактных окон и формирование омических контактов *p*- и *n*-типа на основе AuZn и AuGe/Ni/Au соответственно, формирование металлических контактных площадок на основе Cr/Au общей толщиной 1 мкм. Вольт-амперные, мощностные и спектральные характеристики изготовленных матриц ВИЛ были измерены непосредственно на пластине в непрерывном режиме при комнатной температуре окружающей среды без дополнительного охлаждения (вывод излучения через подложку, без травления сквозных отверстий). Для измерения диаграмм направленности излучения отдельные кристаллы матриц лазерных диодов были собраны на кристаллодержатели.

На рис. 4 представлены вольт-амперные и мощностные характеристики индивидуальных лазерных излучателей. На лучших индивидуальных ВИЛ с диаметром окисленной апертуры 8–10 мкм наблюдалась лазерная генерация в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1,0–2,5 мА, дифференци-

альной эффективностью до 0,4 мВт/мА и максимальной выходной мощностью до 2,5 мВт (рис. 4, *a*). Структуры изготовленных приборов механически стабильны. На рис. 4, *b* приведены вольт-амперные и ватт-амперные характеристики индивидуального излучателя с высоким пороговым напряжением и большим последовательным сопротивлением. Плохие электрические характеристики, возможно, вызваны слишком глубоким травлением второй мезы и (или) слишком слабым легированием контактного *n*-слоя в данном образце. Тем не менее даже при плохих электрических характеристиках ВИЛ обеспечивает уровень выходной мощности до 2 мВт в непрерывном режиме (при рассеиваемой мощности более 100 мВт), что можно объяснить наличием контактного металлического слоя непосредственно на верхнем зеркале, что улучшает теплоотвод от активной области.

Фотография кристаллов матричных излучателей представлена на рис. 5, *a*. Были получены образцы лазерных матриц форматом 8×8 со 100% годных излучателей при шаге между индивидуальными ВИЛ 750 мкм. Распределение выходной мощности индивидуальных ВИЛ по площади для одного из изготовленных матричных излучателей представлено на рис. 5, *b*.

Таким образом, в рамках настоящей работы предложены конструкция и технология изготовления мат-

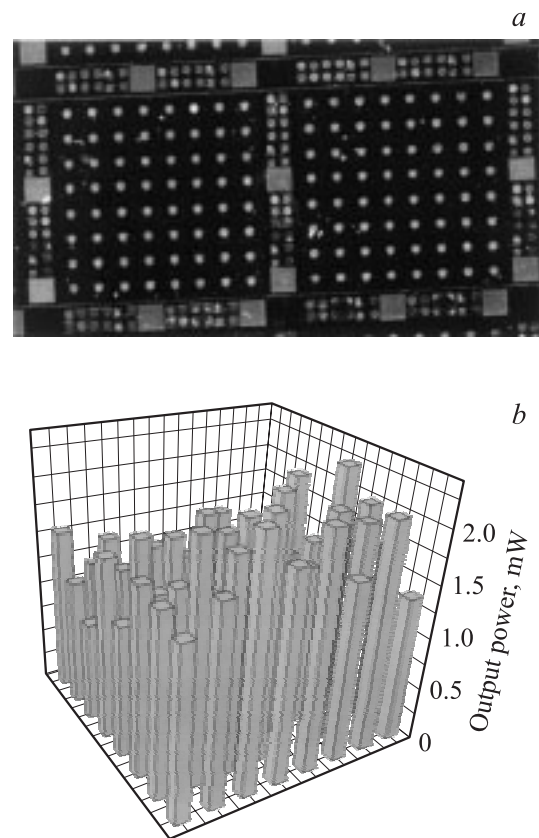


Рис. 5. Фотография кристалла матричного излучателя из 8×8 ВИЛ (*a*) и распределение выходной мощности индивидуальных ВИЛ по площади одного из изготовленных матричных излучателей (*b*).

риц ВИЛ с комбинированными зеркалами (нижним РБО на основе $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ и верхним РБО на основе AlGaO/GaAs) и двумя окисленными апертурами. Проведена оптимизация конструкции эпитаксиальной структуры ВИЛ и технологии селективного окисления, позволяющая проводить одновременное окисление апертурных слоев и РБО при обеспечении необходимой механической стабильности структур ВИЛ. Реализованы матрицы, содержащие 8×8 ВИЛ с активной областью на основе квантовых ям InGaAs . На индивидуальных излучателях достигается лазерная генерация в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.0–2.5 мА на длинах волн 960–965 нм при дифференциальной эффективности до 0.4 мВт/мА и с максимальной выходной мощностью более 2 мВт. Разработанная технология перспективна при создании матричных излучателей для устройств быстродействующих оптической коммутации электронных модулей в перспективных вычислительных системах.

Список литературы

- [1] *Vertical cavity surface emitting lasers*, ed. by L.A. Coldren, H. Temkin and C.W. Wilmsen (Cambridge, Cambridge University Press, 1999).
- [2] D.V. Plant, M.B. Venditti, E. Laprise, J. Faucher, K. Razavi, M. Châteauneuf, A.G. Kirk, J.S. Ahearn. *J. Lightwave Technology*, **19**, 1093 (2001).
- [3] *Оптический процессор EnLight256, реклама компании Lenslet* (2003).
- [4] M.R. Taghizadeh, A.J. Waddie. *IEEE Circuits & Dev. Magazine*, No 11, 17 (2002).
- [5] K.D. Choquette, H.Q. Hou. *Proc. IEEE*, **85**, 1730 (1997).
- [6] D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **11**, 934 (1999).
- [7] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Y. Egorov, N.A. Maleev. *Quantum dot lasers* (Oxford, Oxford University Press, 2003).
- [8] K.D. Choquette, K.M. Geib, C.I.H. Ashby, R.D. Twisten, O. Blum, H.H. Hou, D.M. Follstaedt, B.E. Hammons, D. Mathes, R. Hull. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **3**, 916 (1997).
- [9] N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.P. Vasil'ev, S.S. Mikhrin, Yu.M. Shernyakov, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, D.A. Bedarev, Yu.V. Solov'ev, A.V. Shulenkov, M.V. Maximov, V.A. Grishanov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov. *4th Belarusian–Russian Workshop Semiconductor Lasers and Systems* (Minsk, 2002) p. 111.
- [10] Н.А. Малеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, С.С. Михрин, А.Г. Кузьменков, Д.А. Бедарев, Ю.М. Задранов, М.М. Кулагина, Ю.М. Шерняков, А.С. Шуленков, В.А. Быковский, Ю.М. Соловьев, С. Möller, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. *ФТП*, **37**, 1265 (2003).
- [11] V.A. Haisler, F. Hopfer, R.L. Sellin, A. Lochmann, K. Fleischer, N. Esser, W. Richter, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2544 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Design and fabrication technology of vertical-cavity surface-emitting laser matrix

N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, A.S. Shulenkov*, S.V. Chumak*, E.V. Nikitina, S.A. Blokhin, M.M. Kulagina, E.S. Semenova, D.A. Livshits, M.V. Maximov, V.M. Ustinov

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* Minsk Institute of Radiomaterials,
220024 Minsk, Belorussia

Abstract Design and fabrication of integrated matrix of the vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with oxidized AlGaO/GaAs top and $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ bottom distributed Bragg reflectors (DBRs) are being discussed. Matrix emitters contain 8×8 VCSELs and are based on a double quantum well InGaAs active region. Individual emitters with 8–10 μm oxidized apertures demonstrate lasing at 960–965 nm with room-temperature threshold current of 1.0–2.5 mA, external efficiency up to 0.4 mW/mA and with maximum CW output power more than 2.0 mW.