

Конструкция и технология изготовления вертикально излучающих лазеров с непроводящими эпитаксиальными зеркалами

© Н.А. Малеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, С.С. Михрин, А.Г. Кузьменков, Д.А. Бедарев, Ю.М. Задиранов, М.М. Кулагина, Ю.М. Шерняков, А.С. Шуленков*, В.А. Быковский*, Ю.М. Соловьев⁺, С. Möller[≠], Н.Н. Леденцов, 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

⁺ АОЗТ „Светлана–Электронприбор“,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[≠] Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin,
10587 Berlin, Deutschland

(Получена 11 марта 2003 г. Принята к печати 18 марта 2003 г.)

Рассматриваются конструктивно-технологические проблемы при создании структур полупроводниковых вертикально излучающих лазеров с непроводящими распределенными брэгговскими отражателями, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Вертикально излучающие лазеры с активной областью сформированы на основе квантовых ям InGaAs, с нижним полупроводниковым и верхним оксидированным брэгговскими отражателями при диаметре оксидированной апертуры 7–12 мкм. Приборы демонстрируют лазерную генерацию 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.

В последние годы полупроводниковые вертикально излучающие лазеры (ВИЛ, VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) находят широкое применение в быстродействующих системах передачи и обработки информации [1]. Их основные преимущества по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции — малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, а также возможность групповой технологии изготовления и тестирования приборов на пластине [2]. В отличие от полосковых лазеров со сколотыми гранями, в качестве зеркал резонатора ВИЛ используются распределенные брэгговские отражатели (РБО), сформированные на основе чередующихся слоев материалов с отличающимися показателями оптического преломления, каждый толщиной в одну четверть резонансной длины волны (с учетом показателя преломления). Наибольшее практическое применение нашли полупроводниковые РБО на основе чередующихся слоев $Al_xGa_{1-x}As$ различного состава, а также диэлектрические РБО. Для пространственного ограничения области протекания тока (формирования апертуры ВИЛ) обычно используется изолирующая имплантация протонов или селективное оксидирование скрытых слоев AlGaAs [1,2].

По схеме реализации инжекции носителей заряда в активную (излучающую) область вертикально излучающие лазеры можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся приборы с проводящими полупроводниковыми зеркалами. Конструкция ВИЛ с проводящими зеркалами обеспечивает относительную простоту планарного технологического процесса и успешно используется в промышленной тех-

нологии ВИЛ на диапазон длин волн 0.85 мкм [1]. Однако для реализации легированных РБО с низким сопротивлением требуются сложные профили легирования и состава твердого раствора на границах слоев, которые надо контролировать с высокой точностью [2]. Относительно высокое легирование проводящих зеркал ведет к существенному возрастанию оптических потерь из-за поглощения на свободных носителях, что является серьезным лимитирующим фактором при создании длинноволновых ВИЛ, имеющих сравнительно низкий уровень оптического усиления активной области [3]. Кроме того, в конструкциях с легированными зеркалами трудно получить малые значения паразитной емкости, что может ограничивать частотный диапазон приборов.

Перечисленные факторы стимулируют разработку конструкций ВИЛ с непроводящими зеркалами, в которых один или оба контакта выполнены к проводящим слоям, непосредственно примыкающим к активной (излучающей) области ВИЛ (так называемые intracavity-contacted VCSELs) [2,4]. Поскольку в данном случае обе контактные площадки могут располагаться на лицевой стороне полупроводниковой структуры, такие приборы идеально подходят для монтажа методом перевернутого кристалла (flip-chip) с выводом излучения через подложку. Такой метод оптимален для интеграции матричных излучателей на основе ВИЛ и цифровых кремниевых интегральных схем [5]. Кроме того, нелегированные полупроводниковые или диэлектрические зеркала обеспечивают минимальный уровень оптических потерь, что позволяет реализовать длинноволновые ВИЛ [4]. К настоящему времени для различных спектральных диапазонов успешно продемонстрирована возможность

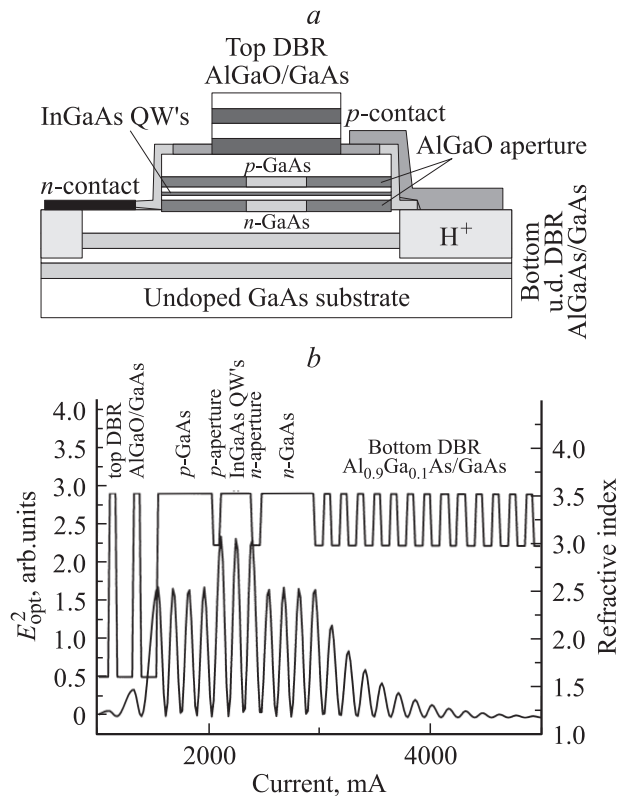


Рис. 1. *a* — схематическое поперечное сечение структуры вертикально излучающего лазера с нижним полупроводниковым и верхним оксидированным брегговскими отражателями; *b* — расчетные профили распределения показателя преломления и интенсивности световой волны в вертикальном микрорезонаторе для предлагаемой структуры лазера.

создания ВИЛ с непроводящими зеркалами, в которых использованы либо два полупроводниковых РБО, либо нижний полупроводниковый РБО в сочетании с верхним диэлектрическим [2–4]. Еще одной интересной возможностью является использование зеркал на основе AlGaO/GaAs, которые формируются путем селективного оксидирования слоев AlGaAs с высоким содержанием Al [6].

Оксидированные РБО обеспечивают высокие уровни отражения в широком диапазоне длин волн и малую глубину проникновения оптического поля в зеркала [2], что позволило успешно использовать активную область на основе квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs, обладающую сравнительно низким уровнем оптического усиления, и впервые создать ВИЛ на диапазон длин волн 1300 нм на подложках арсенида галлия, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговым током ~ 1.5 мА, выходной мощностью до 1 мВт и внешней дифференциальной эффективностью более 45% [7,8]. Однако высокое последовательное сопротивление приборов (~ 200 – 300 Ом) [7], необходимость тщательной калибровки композиции слоев структуры для обеспечения заданных скоростей оксидирования [6] и проблемы механической надежности оксидированных зеркал [6,9]

создают определенные трудности. В связи с этим актуальна задача поиска таких конструктивно-технологических решений, которые позволят сохранить высокую добротность вертикального оптического микрорезонатора при одновременном упрощении технологии изготовления ВИЛ и повышении их надежности.

В настоящей работе представлены результаты оптимизации конструкции и технологии изготовления ВИЛ с непроводящими зеркалами и активной областью на основе КЯ InGaAs, выращиваемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs. Показана возможность прецизионного ионно-лучевого травления структур многослойных РБО с контролируемым наклоном стенок меза-структур и формирования надежных селективно-оксидированных зеркал. Изготовленные ВИЛ с диаметром оксидированной апертуры 7–12 мкм демонстрируют лазерную генерацию 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.

В результате проведенного теоретического анализа была предложена комбинированная конструкция ВИЛ с нижним нелегированным полупроводниковым РБО на основе AlGaAs/GaAs и верхним оксидированным РБО (рис. 1, *a*). Поскольку предусматривается вывод излучения через подложку, требования к уровню отражения нижнего зеркала не столь высоки и воспроизводимое формирование полупроводниковых РБО с необходимыми характеристиками уверенно обеспечивается используемой эпитаксиальной технологией. При разработке конструкции оптического резонатора учитывалась необходимость использования относительно толстых контактных *p*- и *n*-слоев, которые должны обеспечить приемлемый уровень последовательного сопротивления и воспроизводимое попадание в нужную область при травлении многоступенчатой меза-структуры ВИЛ. Для снижения внутренних оптических потерь, в первую очередь обусловленных поглощением на свободных носителях в *p*-слое, использовано неоднородное легирование контактных слоев, при котором сильно легированные прослойки помещаются в расчетных положениях минимумов стоячей оптической волны. Два относительно толстых оксидированных апертурных слоя позволяют частично перераспределить оптическое поле в резонаторе (рис. 1, *b*), что ведет к дополнительному снижению потерь и увеличению фактора оптического ограничения по сравнению со структурой с одной тонкой апертурой [10]. Контактные площадки *p*- и *n*-типа расположены на контактном слое *n*-типа. При этом для устранения токов утечки и снижения паразитных емкостей использована дополнительная изолирующая имплантация протонов. В предложенной конструкции отсутствует необходимость в травлении третьей мезы (до подложки), что существенно упрощает технологию изготовления ВИЛ.

Структуры ВИЛ с активными слоями на основе КЯ InGaAs в данной работе выращивались методом МПЭ

на установке Riber 32. 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 GaAs;
- нижнего апертурного слоя *n*-Al_{0,98}Ga_{0,02}As с градиентным изменением состава на границах;
- контактного слоя *n*-GaAs;
- нижнего РБО, содержащего 19 пар слоев Al_{0,95}Ga_{0,05}As/GaAs.

Толщины слоев AlGaAs и GaAs в нижнем РБО, в апертурных слоях и слоях GaAs в верхнем РБО примерно соответствуют 1/4 резонансной длины волны λ_{Bragg} вертикального микрорезонатора. Полная геометрическая толщина резонатора L_{cav} примерно соответствует $5\lambda_{\text{Bragg}}$. Толщины слоев Al_{0,97}Ga_{0,03}As в верхнем РБО выбираются так, чтобы после селективного оксидирования их толщина соответствовала $(1/4)\lambda_{\text{Bragg}}$ (с учетом изменения показателя преломления и некоторого механического сжатия слоев после оксидирования).

Основной проблемой при эпитаксиальном выращивании структур ВИЛ является необходимость прецизионного (с точностью не хуже 1%) контроля толщины и состава слоев [1,2]. При этом наиболее критична толщина оптического микрорезонатора L_{cav} , поскольку именно она в решающей степени определяет рабочую длину волны вертикального лазера. Использование предварительных калибровок не всегда обеспечивает необходимую точность из-за возможных флуктуаций скоростей роста и положения подложкодержателя. Однако конструкция с нелегированными зеркалами открывает возможность для промежуточного контроля параметров структуры с последующей корректировкой толщины резонатора. Суть используемой процедуры состоит в прерывании роста при номинальной толщине резонатора, несколько меньшей, чем проектная. После этого образец помещался в шлюзовую камеру установки МПЭ, где измеряется его спектр отражения, из которого определяются толщины слоев нижнего РБО и общая толщина резонатора (с использованием методов обратного математического моделирования [11]). Затем образец помещается в ростовую камеру установки МПЭ и рост структуры завершается с учетом необходимых корректировок.

К числу наиболее критичных операций в технологии ВИЛ относится прецизионное травление многоступенчатых меза-структур. В связи с большим числом чередующихся слоев AlGaAs, сильно различающихся по составу, использование химического травления оказывается в данном случае проблематичным. Поэтому в технологии ВИЛ широко используются методы сухого травления, которые, как правило, дают практически вертикальную стенку мезы [2,11]. Это затрудняет со-

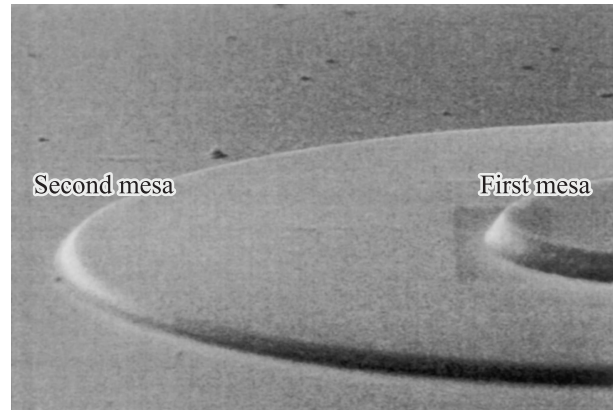


Рис. 2. Микрофотография структуры вертикально излучающего лазера после сухого травления верхнего брегговского отражателя до контактного *p*-слоя (1-я меза) и резонатора до контактного *n*-слоя (2-я меза).

единение *p*- и *n*-контактов с соответствующими контактными площадками (с учетом характерной высоты меза-структур в несколько мкм). В рамках настоящей работы была создана методика сухого травления в пучке ионов Ag⁺, позволяющая воспроизводимо получать заданный наклон стенок меза-структур. Она основана на использовании фоторезиста с повышенной вязкостью, подборе оптимальных режимов сушки и экспонирования, оптимизации угла между подложкой и потоком ионов, а также оптимальной энергии ионного пучка (~ 1 эВ). На рис. 2 приведена микрофотография двухступенчатой меза-структуры ВИЛ, полученной с использованием разработанной методики сухого травления.

Другая критическая операция при изготовлении ВИЛ — формирование оксидированных апертур и оксидирование верхнего зеркала. Особенность разработанного технологического процесса состоит в одновременном селективном оксидировании всех слоев структуры. Это требует подбора определенного сочетания размеров мез и соответствующего выбора композиции слоев структуры. Если скорость оксидирования для верхнего зеркала меньше, чем для апертурных слоев, это приведет к невозможности получения нормальной приборной структуры, так как апертура „схлопнется“ раньше, чем будет окончательно сформировано верхнее зеркало. Поэтому толщины и состав оксидируемых слоев выбираются таким образом, чтобы верхнее зеркало полностью оксидировалось быстрее, чем апертурные слои. Однако слишком большая разница в скоростях оксидирования приводит к тому, что верхний РБО будет сильно переоксидирован. Переоксидирование верхнего РБО ухудшает механические характеристики структуры из-за слишком сильного сжатия слоев и снижает коэффициент отражения из-за ухудшения морфологии. Еще одна трудность состоит в том, что малое содержание Ga (единицы %) в оксидируемых слоях AlGaAs не позволяет эффективно использовать такие методы предварительной калибровки состава, как измерения фотолуминесценции

или рентгеновской дифракции [6]. Поэтому использовались специальные тестовые структуры, позволяющие непосредственно откалибровать скорости оксидирования для слоев различного состава и толщины, как показано на рис. 3, *a*. Видно, что глубина оксидирования зависит не только от состава, но и от толщины слоев, что дает дополнительную степень свободы при проектировании эпитаксиальной структуры ВИЛ. Для повышения механической надежности оксидированных структур существенную роль играет выбор режимов процесса оксидирования, особенно обеспечение удаления остаточных продуктов из оксидированных слоев [9]. На рис. 3, *b* показаны тестовые меза-структуры со сформированными аперттурами разного размера после завершения процесса селективного оксидирования и проведения быстрого термического отжига, моделирующего процедуру формирования контактов. Оптимизированная технология обеспечивает однородность размеров апертур и механическую стабильность структур.

После травления мез и селективного оксидирования производится формирование омических контактов *p*- и *n*-типа, пассивация приборной структуры диэлектриком, изолирующая имплантация, вскрытие контактных окон и формирование контактных площадок [12]. Затем вольт-амперные, мощностные и спектральные характеристики ВИЛ были измерены непосредственно на пластине в непрерывном режиме при комнатной температуре окружающей среды без дополнительного охлаждения (вывод излучения через подложку). Для измерения диаграмм направленности излучения отдельные кристаллы лазерных диодов были собраны на кристаллодержателях.

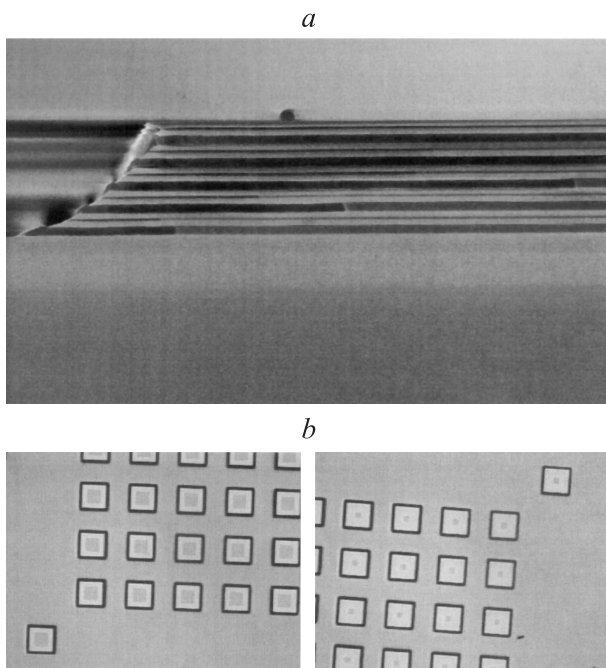


Рис. 3. СЭМ-изображение скола тестовой структуры для калибровки скоростей оксидирования; *b* — микрофотографии тестовых меза-структур с оксидированными аперттурами.

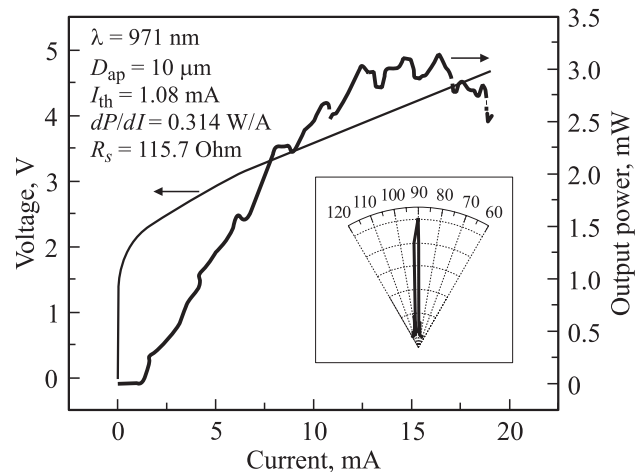


Рис. 4. Типичные вольт-амперная и мощностная характеристики для реализованных вертикально излучающих лазеров. На вставке — диаграмма направленности выходного излучения.

На рис. 4 представлены типичные вольт-амперная и мощностная характеристики для изготовленных ВИЛ. На вставке приведена диаграмма направленности выходного излучения (в полярных координатах). Лучшие из реализованных ВИЛ с диаметром оксидированной аперттуры $D_{ap} = 7\text{--}12\text{ мкм}$ демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами $I_{th} = 0.5\text{--}1.5\text{ мА}$, дифференциальной эффективностью до $dP/dI = 0.5\text{ мВт/мА}$ и максимальной выходной мощностью до 3 мВт . Структуры приборов механически стабильны, а их последовательное сопротивление лежит в диапазоне $R_s = 80\text{--}150\text{ Ом}$.

Таким образом, в рамках данной работы экспериментально апробирована конструкция и технология изготовления ВИЛ с комбинированными зеркалами (нижним РБО на основе $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}/\text{GaAs}$ и верхним РБО на основе AlGaO/GaAs) и двумя оксидированными аперттурами. Предложена технология сухого травления многослойных структур ВИЛ в пучке ионов Ar^+ , позволяющая воспроизводимо получать заданный наклон стенок меза-структур, а также оптимизирована технология селективного оксидирования, обеспечивающая механическую стабильность структур ВИЛ. Продемонстрированное недавно существенное улучшение свойств активной области инжекционных лазеров на основе КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ позволяет в будущем рассчитывать на успешное использование предложенной конструкции для реализации длинноволновых ВИЛ на подложках GaAs.

Список литературы

- [1] K.D. Choquette, H.Q. Hou. Proc. IEEE, **85**, 1730 (1997).
- [2] *Vertical cavity surface emitting lasers*, ed. by L.A. Coldren, H. Temkin, C.W. Wilmsen (Cambridge Univ. Press, 1999).
- [3] L.A. Coldren, E. Hall, S. Nakagawa. Proc. Electronic Components and Technology Conference (2001).

- [4] D.L. Huffaker, D.G. Deppe. IEEE Photon. Technol. Lett., **11**, 934 (1999).
- [5] R. Pu, C. Duan, C.W. Wilmsen. IEEE J. Selected Topics Quant. Electron., **5**, 201 (1999).
- [6] 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. Selected Topics Quant. Electron., **3**, 916 (1997).
- [7] J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. Electron. Lett., **36**, 1384 (2000).
- [8] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, N.A. Cherkashin, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, J.A. Lott, D. Bimberg. *Proc. Conf. „Optoelectronics 2002“*, San Jose, CA, USA, Jan. 20–25, 2002. SPIE's Photonics West (2002), 4646, Technical Summary Digest, p. 49.
- [9] H.Q. Jia, H. Chen, W.C. Wang, W.X. Wang, W. Li, Q. Huang, J. Zhou. J. Cryst. Growth, **223**, 484 (2001).
- [10] Н.А. Малеев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **35**, 881 (2000). [Semicond., **35**, 847 (2001)].
- [11] J. Kaindl, S. Stoier, G. Franz. J. Electrochem. Soc., **142**, 2418 (1995).
- [12] N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.P. Vasil'ev, S.S. Mikhrin, Yu.M. Shernyakov, M.V. 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. *Proc. of 4th Belarusian–Russian Workshop „Semiconductor Lasers and Systems“* (May 20–22, 2002, Minsk, Belarus) p. 111.

Редактор Т.А. Полянская

Design and technology of vertical-cavity lasers with non-conductive epitaxial mirrors

N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, S.S. Mikhrin, A.G. Kuzmenkov, D.A. Bedarev, Yu.M. Zadiranov, M.A. Kulagina, Yu.M. Shernyakov, A.S. Shulenkov*, V.A. Bykovsky*, Yu.M. Solov'ev⁺, C. Möller[≠], N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Science
194021 St. Petersburg, Russia

* Minsk Institute of Radiomaterials,
220024 Minsk, Belorussia

⁺ „Svetlana–Electrondevices“,
194021 St. Petersburg, Russia

[≠] Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin,
10587 Berlin, Deutschland

Abstract Design and technology of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with non-conductive distributed Bragg reflectors (DBRs) grown by molecular beam epitaxy are discussed. Double intracavity-contacted quantum well VCSELs with AlGaAs/GaAs bottom DBR and oxidized top AlGaO/GaAs DBR demonstrate room-temperature threshold current of 0.5–1.5 mA, external efficiency up to 50%, and CW output power up to 3.0 mW.