

## Пространственно-одномодовые полупроводниковые вертикально излучающие лазеры с неплоским верхним распределенным брэгговским отражателем

© Н.А. Малеев\*<sup>†</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>++</sup>, М.М. Кулагина\*, Ю.М. Задиранов\*, А.П. Васильев\*<sup>†</sup>, С.А. Блохин<sup>++</sup>, А.С. Шуленков\*, С.И. Трошков\*, А.Г. Гладышев<sup>+</sup>, А.М. Надточий\*, М.М. Павлов<sup>++</sup>, М.А. Бобров<sup>++</sup>, Д.Е. Назарук\*, В.М. Устинов\*

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

<sup>+</sup> ООО „Коннектор Оптик“,

194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>•</sup> Минский НИИ радиоматериалов,

220024 Минск, Республика Белоруссия

(Получена 17 октября 2012 г. Принята к печати 24 октября 2012 г.)

Реализованы пространственно-одномодовые полупроводниковые вертикально излучающие лазеры спектрального диапазона 850 нм с верхним (выводным) неплоским диэлектрическим распределенным брэгговским отражателем. Предложенная конструкция обеспечивает стабильную одномодовую генерацию во всем диапазоне рабочих токов, ограниченном перегревом активной области. Приборы с внутривибраторными контактами и относительно большим диаметром токовой апертуры (5–6 мкм) демонстрируют пространственно-одномодовую лазерную генерацию на длине волны 840–845 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.2–1.3 мА, дифференциальной эффективностью 0.5–0.55 мВт/мА и выходной мощностью до 2 мВт.

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) находят широкое применение в быстродействующих системах волоконно-оптической связи и различных оптических сенсорах благодаря малой угловой расходимости и симметричной диаграмме направленности выходного оптического излучения, низким рабочим токам, высокому быстродействию, групповой технологии изготовления и возможности тестирования приборов непосредственно на пластине до разделения на кристаллы [1,2].

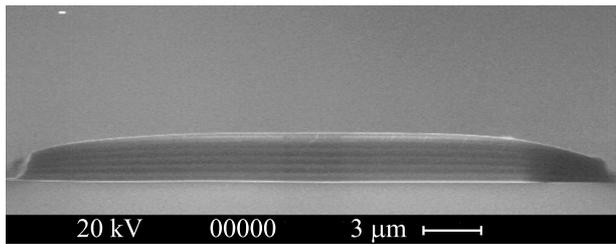
Для целого ряда применений (высокоскоростная передача данных по одномодовым оптическим волокнам, компактные атомные стандарты частоты, оптические системы связи в свободном пространстве, лазерные локаторы и др.) необходимо обеспечить максимально узкий спектр и высокое качество выходного пучка лазерного излучения, что требует использования пространственно-одномодовых лазерных излучателей. Наиболее очевидный подход к созданию пространственно-одномодовых ВИЛ основан на уменьшении геометрических размеров селективно-окисленной токовой апертуры (до 3–4 мкм для ВИЛ спектрального диапазона 850 нм) с целью заведомого обеспечения одномодового режима эффективного оптического волновода [3]. Однако сложность контролируемого и воспроизводимого формирования селективно-окисленных токовых апертур с малыми размерами, ограниченная максимальная выходная мощность, высокое последовательное сопротивление и недостаточная надежность из-за высокой плотности тока ограничивают возможности практического использова-

ния данного подхода [4]. Был предложен ряд альтернативных подходов, среди которых можно выделить использование вытравленного поверхностного рельефа [5], поверхностной структуры типа „фотонного кристалла“ [6] или интегральной линзы [7]. Перечисленные способы позволяют получить одномодовую генерацию при относительно больших размерах токовой апертуры и повысить предельную выходную мощность, однако требуют существенного усложнения технологии и не всегда оптимальны для создания высокоскоростных ВИЛ.

Реализация ВИЛ с быстродействием до 25 Гбит/с и выше требует использования малого объема оптического микрорезонатора для обеспечения высокой плотности фотонов, т.е. уменьшения размеров токовой апертуры. Однако из-за необходимости обеспечения надежности и приемлемых значений теплового сопротивления оптимальный размер токовой апертуры для высокоскоростных ВИЛ спектрального диапазона 850 нм лежит в области 5–7 мкм [8]. В настоящей работе предложен способ формирования неплоских диэлектрических распределенных брэгговских отражателей (РБО) с неоднородной толщиной отдельных слоев по площади светоизлучающей области и показана возможность их использования для создания пространственно-одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 850 нм, имеющих размеры токовой апертуры, оптимальные для получения высокоскоростных и потенциально надежных приборов.

Современная промышленная технология ВИЛ спектрального диапазона 650–1150 нм преимущественно базируется на использовании легированных полупроводниковых РБО в системе материалов AlGaAs–GaAs [1]. В то же время в ряде случаев (в частности, при создании

<sup>†</sup> E-mail: maleev.beam@mail.ioffe.ru  
vasiljev@mail.ioffe.ru



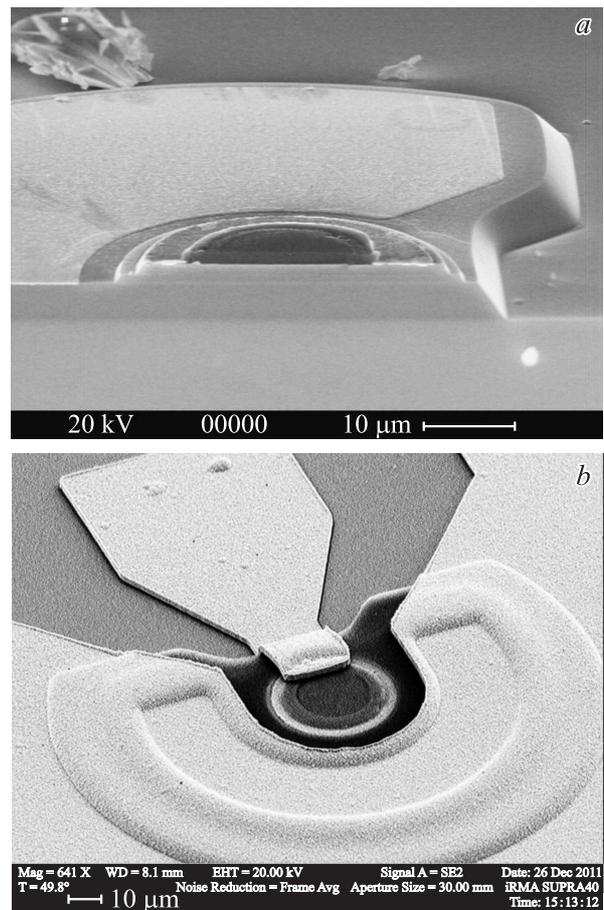
**Рис. 1.** Микрофотография поперечного скола структуры неплоского диэлектрического РБО, полученная с помощью растрового электронного микроскопа.

длинноволновых или коротковолновых ВИЛ) диэлектрические РБО являются наиболее приемлемым или даже единственно возможным решением [9]. Оптимальным технологическим способом для локального формирования диэлектрических РБО в заданной области ВИЛ является „взрывная“ технология. В этом случае отпадает необходимость длительного травления многослойных диэлектрических композиций с применением устойчивых масок. В качестве верхних РБО для ВИЛ спектрального диапазона 850 нм нами использовалась система материалов  $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$ , обеспечивающая хороший контраст показателей преломления слоев ( $n\text{-TiO}_2 \approx 2.25$ ,  $n\text{-SiO}_2 \approx 1.45$ ) и соответственно высокие значения коэффициентов отражения в широком спектральном диапазоне при использовании 5–6 пар четвертьволновых слоев  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ . Для осаждения диэлектрических слоев использовалась технология магнетронного распыления. В качестве маски для локального формирования структур РБО методом „взрыва“ использовалась двухслойная композиция на основе LOR10B и AZ1518. Выбор определенных режимов проявления и термообработки позволяет обеспечить формирование структур РБО, обладающих заметным градиентом толщин отдельных слоев в краевых областях. На рис. 1 приведена микрофотография поперечного скола одной из таких структур РБО, полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Центральная область рассматриваемой структуры РБО состоит из плоских чередующихся четвертьволновых слоев  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , толщины которых хорошо воспроизводятся от слоя к слою. В то же время в краевых областях наблюдается заметное уменьшение толщины слоев по мере удаления от подложки, что приводит к формированию „линзоподобной“ структуры РБО вместо идеального цилиндрического столбика. Подобные структуры неплоских диэлектрических РБО, имеющие в плане цилиндрическую форму и различающиеся латеральными размерами (диаметром), были использованы в дальнейших экспериментах в качестве верхних (выводных) отражателей ВИЛ.

Исходная эпитаксиальная гетероструктура ВИЛ была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полужолирующей подложке GaAs. Нижний брэгговский отражатель состоит из 30 пар чередующихся

нелегированных четвертьволновых слоев  $\text{Al}_{0.9}\text{G}_{0.1}\text{As}$  и  $\text{Al}_{0.15}\text{G}_{0.85}\text{As}$ , легированного кремнием скрытого контактного слоя  $n\text{-Al}_{0.15}\text{G}_{0.85}\text{As}$  и непосредственно примыкающих к активной области 5 пар легированных кремнием слоев  $n\text{-Al}_{0.9}\text{G}_{0.1}\text{As}$  и  $n\text{-Al}_{0.15}\text{G}_{0.85}\text{As}$  с градиентным изменением состава на границах. Для увеличения дифференциального усиления в активной области структуры использованы 5 напряженных слоев  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$  ( $y \approx 0.1$ ) в матрице  $\text{AlGaAs}$ . Непосредственно над активной областью расположен легированный углеродом апертурный слой  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с высоким ( $x > 0.98$ ) содержанием Al, после которого следуют 5 пар легированных углеродом слоев  $p\text{-Al}_{0.9}\text{G}_{0.1}\text{As}$  и  $p\text{-Al}_{0.15}\text{G}_{0.85}\text{As}$  с градиентным изменением состава на границах, завершающихся контактным слоем  $p\text{-Al}_{0.15}\text{G}_{0.85}\text{As}$ . Для обеспечения низких значений контактного сопротивления и сопротивления растекания при сохранении низких внутренних оптических потерь использовались неоднородные профили легирования контактных слоев.

На рис. 2 приведены изображения поперечного скола и общего вида приборной структуры ВИЛ, полученные с помощью растрового электронного микроскопа



**Рис. 2.** Изображения поперечного скола (а) и общего вида (б) приборной структуры ВИЛ, полученные с помощью растрового электронного микроскопа на различных стадиях технологического процесса.

па на различных стадиях технологического процесса. Приборы реализованы в высокочастотной топологии с копланарной геометрией контактных площадок. В технологическом процессе изготовления ВИЛ использовались разработанные ранее процессы сухого травления пучком Ag под маской фоторезиста и селективного окисления апертурных слоев AlGaAs [10]. Изготовление приборов начиналось с формирования металлизации *p*-контактов в кольцевой топологии и меток совмещения. Затем, после травления первой мезаструктуры и вскрытия боковых стенок активной области, проводилось селективное окисление апертурных слоев с проектным размером токовой аперттуры 5–6 мкм, производилось второе сухое травление до скрытого контактного слоя *n*-Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As и формирование металлизации *n*-контактов в полукольцевой топологии. Затем осуществлялось локальное формирование верхних диэлектрических РБО цилиндрической топологии с помощью описанной выше „взрывной“ технологии. Варьирование размеров структур РБО обеспечивало возможность формирования на одном образце приборов двух типов. ВИЛ 1-го типа с

Сравнительные характеристики ВИЛ двух типов

Характеристика, ед. изм.	ВИЛ № 1	ВИЛ № 2
Пороговый ток, мА	1.0	1.3
Дифференциальная эффективность, мВт/мА	0.72	0.55
Выходная мощность*, мВт	2.8	1.85
Падение напряжения*, В	2.65	2.9
Последовательное дифференциальное сопротивление*, Ом	170	180

Примечание. \* Значения характеристик при рабочем токе 5 мА.

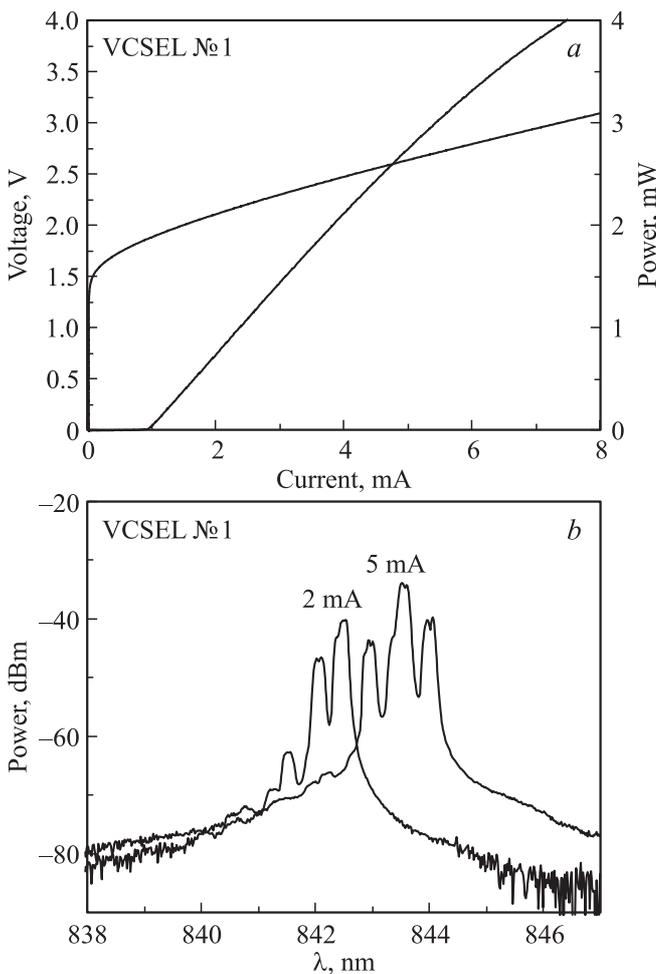
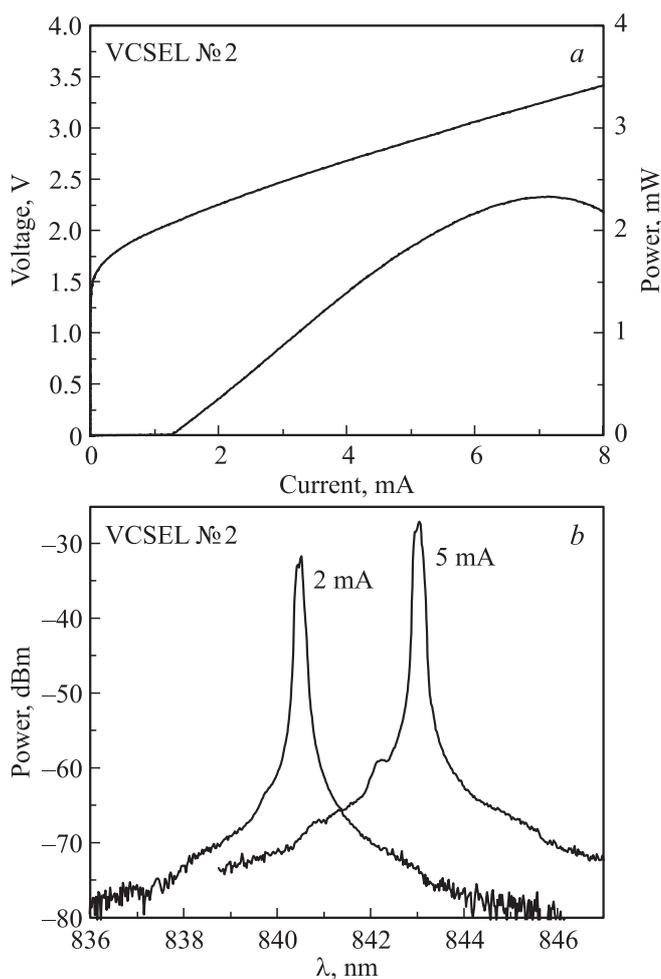


Рис. 3. *a* – вольт-амперная и мощностная характеристики ВИЛ с плоским верхним (выводным) РБО; *b* — спектры лазерной генерации при значениях токов накачки 2 и 5 мА.

большим диаметром диэлектрического РБО фактически имеют классическую конструкцию с плоским профилем верхнего отражателя в пределах излучающей области и ее ближайших окрестностей. Для ВИЛ 2-го типа неплоская краевая зона РБО находится в непосредственной близости к краям светоизлучающей области. После сухого травления третьей (изолирующей) мезаструктуры до нелегированного буферного слоя, отдельные приборные структуры принимают вид, соответствующий рис. 2, *a*, и готовы для предварительных измерений статических характеристик. Для проведения финальных исследований формировалась окончательная высокочастотная топология кристаллов ВИЛ, для чего осуществлялась пассивация приборной структуры слоем SiO<sub>2</sub>, вскрытие контактных окон, планаризация структуры слоем бензоциклобутена (BCB) и формирование металлизации контактных площадок в копланарной геометрии (см. рис. 2, *b*).

Вольт-амперные, мощностные и спектральные характеристики изготовленных ВИЛ были измерены непосредственно на пластине в непрерывном режиме при комнатной температуре. На рис. 3, *a* представлены вольт-амперная и мощностная характеристики для ВИЛ 1-го типа, имеющего классический (плоский) верхний диэлектрический РБО, а на рис. 3, *b* — спектры излучения этого прибора при двух значениях рабочего тока. Аналогичные данные для ВИЛ 2-го типа представлены на рис. 4, *a* и *b* соответственно. Оба исследованных прибора изготовлены из одной эпитаксиальной гетероструктуры и имеют близкие диаметры токовых апертур (около 5.5 мкм).

Основные характеристики ВИЛ двух типов суммированы в таблице. Как и ожидалось, значения последовательного сопротивления для двух приборов близки, поскольку близки размеры токовых апертур. В то же время, значения порогового тока, дифференциальной эффективности и выходной мощности заметно отличаются. Интересно, что, хотя ВИЛ № 2 имеет более низкую мощность и дифференциальную эффективность, чем ВИЛ № 1, одновременно он имеет более высокий пороговый ток, что не позволяет объяснить наблюдаемую разницу характеристик разбросом параметров приборов по площади эпитаксиальной структуры (например, меньшим размером токовой аперттуры для



**Рис. 4.** *a* — вольт-амперная и мощностная характеристики ВИЛ с неплоским верхним (выводным) РБО; *b* — спектры лазерной генерации при значениях токов накачки 2 и 5 мА.

прибора № 2). Прибор № 1 демонстрирует зависимость спектра излучения от тока накачки, характерную для пространственно-многомодовых ВИЛ с относительно небольшими размерами токовой апертуры. Начиная с порога наблюдается многомодовая генерация с начальным доминированием фундаментальной моды и последующим возрастанием роли высших мод. В противоположность, прибор № 2 демонстрирует пространственно-одномодовую генерацию с фактором подавления высших мод более 30 дБ вплоть до тока накачки 5 мА. При этом длины волн генерации фундаментальной моды для обоих приборов близки и укладываются в пределы, определяемые неоднородностью параметров по площади эпитаксиальной структуры.

Различия в поведении двух приборов можно объяснить специфическим влиянием конструкции верхнего диэлектрического РБО. В случае близости неплоских краевых зон РБО к границам светоизлучающей области, как это наблюдается для прибора № 2, для мод высшего порядка, занимающих относительно большую площадь

и более удаленных от вертикальной оси прибора, будут наблюдаться относительно высокие оптические потери, в то время как локализованная у оси микрорезонатора ВИЛ фундаментальная мода находится в более выгодных условиях для поддержания лазерной генерации.

Наблюдаемые различия в поведении исследованных ВИЛ воспроизводимо наблюдаются для всех изготовленных приборов, имеющих аналогичные параметры верхнего диэлектрического РБО, что позволяет сделать вывод о практической возможности контроля модового состава излучения вертикально излучающих лазеров за счет использования верхнего (выводного) неплоского диэлектрического РБО. ВИЛ с такими верхними зеркалами при относительно больших диаметрах токовой апертуры (5–6 мкм) демонстрируют пространственно-одномодовую лазерную генерацию на длине волны 840–845 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.2–1.3 мА, дифференциальной эффективностью 0.5–0.55 мВт/мА и выходной мощностью до 2 мВт.

Работа выполнялась при частичной поддержке программы № 24 президиума РАН, гранта РФФИ 11-02-12239-офи\_м и Федеральной целевой программы „Научные и педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 г.г., госконтракт 14.740.11.0066.

## Список литературы

- [1] *Vertical cavity surface emitting lasers*, ed. by L.A. Coldren, H. Temkin, C.W. Wilmsen. (Cambridge Univ. Press, 1999).
- [2] R. Szweda, *III-Vs Review*, **19**, 34 (2006).
- [3] B. Weigl, M. Grabherr, R. Michalzik, G.Reiner, K.J. Ebeling. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **8**, 971 (1996).
- [4] D.H. Lim, S.M. Hwang, S.H. Nam. *Proc. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, **2**, 724 (2001).
- [5] A. Haglund, J.S. Gustavsson, J. Vukusic, P. Modh, A. Larsson. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **16**, 368 (2004).
- [6] A.M. Kasten, J.D. Sulkin, P.O. Leisher, D.K. McElfresh, D. Vacar, K.D. Choquette. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **14**, 1123 (2008).
- [7] S.-H. Park, Y. Park, H. Kim, H. Jeon, S.M. Hwang, J.W. Lee, S.H. Nam, B.C. Koh, J.Y. Sohn, D.S. Kim. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 183 (2002).
- [8] S.A. Blokhin, J.A. Lott, N.N. Ledentsov, L.Ya. Karachinsky, A.G. Kuzmenkov, I.I. Novikov, N.A. Maleev, G. Fiol, D. Bimberg. *Optoelectronic Materials and Devices VI*, ed. by Guang-Hua Duan. *Proc. SPIE-OSA-IEEE*, **8308**, 830 819 (2011).
- [9] D. Sun, W. Fan, P. Kner, J. Boucart, T. Kageyama, R. Pathak, D. Zhang, W. Yuen. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **15**, 1677, (2003).
- [10] Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.С. Шуленков, С.В. Чумаков, 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).

Редактор Т.А. Полянская

## Single-mode VCSELs with non-flat dielectric top DBR

*N.A. Maleev<sup>\*+</sup>, A.G. Kuzmenkov<sup>+\*</sup>, M.M. Kulagina<sup>\*</sup>,  
Yu.M. Zadiranov<sup>\*</sup>, A.P. Vasil'ev<sup>+</sup>, S.A. Blokhin<sup>\*+</sup>,  
A.S. Shulenkov<sup>•</sup>, S.I. Troshkov<sup>\*</sup>, A.G. Gladyshev<sup>+</sup>,  
A.M. Nadtochiy<sup>\*</sup>, M.M. Pavlov<sup>\*+</sup>, M.A. Bobrov<sup>\*+</sup>,  
D.E. Nazaruk<sup>\*</sup>, V.M. Ustinov<sup>\*</sup>*

\* Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

+ Connector Optics LLC,  
194292 St. Petersburg, Russia

• Minsk Research Institute of Radiomaterials,  
220024 Minsk, Belorussia

**Abstract** Single-mode vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) with non-flat top dielectric DBR is realized. Proposed VCSEL structure provides stable single-mode lasing up to thermal roll-over. Intracavity-contacted top-emitting device with relatively large ( $5\text{--}6\ \mu\text{m}$  in diameter) oxidized aperture demonstrates room-temperature continuous wave single-mode lasing at  $840\text{--}845\ \text{nm}$  with threshold current of  $1.2\text{--}1.3\ \text{mA}$ , differential efficiency of  $0.5\text{--}0.55\ \text{mW/mA}$  and maximum output power about  $2\ \text{mW}$ .