

Вертикально-излучающие лазеры на основе массивов субмонослойных квантовых точек InGaAs

© С.А. Блохин[¶], Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Ю.М. Шерняков, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, В.В. Дюделев, Г.С. Соколовский, В.И. Кучинский, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Р. Ковш*, С.С. Михрин*, Н.Н. Леденцов*

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

* NL-Nanosemiconductors GmbH, 44227 Dortmund, Germany

(Получена 27 сентября 2005 г. Принята к печати 10 октября 2005 г.)

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены структуры вертикально-излучающих лазеров с активной областью на основе массивов субмонослойных квантовых точек InGaAs и легированными распределенными брэгговскими отражателями AlGaAs/GaAs. Показана работа одномодовых вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 980 нм с диаметром токовой апертуры 3 мкм, пороговым током 0.6 мА, максимальной выходной мощностью до 4 мВт и внешней дифференциальной эффективностью 68%. Многомодовые вертикально-излучающие лазеры с диаметром апертуры 10–12 мкм обладают сверхнизкими внутренними оптическими потерями (0.09% на один проход фотона), что сравнимо с лучшими результатами для лазеров такого типа с нелегированными распределенными брэгговскими отражателями.

PACS: 42.55.Px, 78.67.He

1. Введение

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) основаны на использовании вертикальных оптических микрорезонаторов с зеркалами в виде распределенных брэгговских отражателей (РБО, DBR) и обладают рядом существенных достоинств по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции. К их числу относятся малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, возможность обеспечения субмиллиамперных пороговых токов, групповая технология изготовления и возможность тестирования приборов непосредственно на пластине [1]. В последние годы ВИЛ находят все более широкое применение в быстродействующих системах волоконно-оптической связи, оптических сенсорах и устройствах обработки информации.

В большинстве современных ВИЛ различных спектральных диапазонов успешно используются активные области на основе одной или нескольких квантовых ям, помещенных вблизи пучностей оптического поля. При этом активная область прибора (область протекания тока и излучательной рекомбинации носителей) ограничивается с помощью апертурных слоев AlGaAs с селективным окислением или с помощью имплантации протонов [1]. Перспективным направлением является использование в качестве активной области ВИЛ массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ, QD) [2,3]. В частности, это позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения ВИЛ на подложках

арсенида галлия [4] и создавать приборы с субмикрометровой апертурой без существенного увеличения порогового тока [2,5].

К числу основных проблем при создании ВИЛ на основе самоорганизующихся КТ InGaAs, получаемых методом Странски–Крастанова, относится сравнительно низкий уровень модового оптического усиления, обусловленный недостаточной поверхностной плотностью массива КТ. Использование активных областей со многими слоями КТ лишь частично позволяет преодолеть указанное ограничение, поскольку вблизи каждого максимума оптического поля удается разместить не более 2–3 слоев КТ. В результате практически во всех реализованных ВИЛ на основе КТ используется конструкция с нелегированными РБО и внутриврезонаторными токовыми контактами к скрытым проводящим слоям, позволяющая обеспечить минимальный уровень внутренних оптических потерь [2]. Такая конструкция существенно сложнее в реализации по сравнению с традиционной конструкцией ВИЛ GaAs/AlGaAs диапазона 0.85 мкм с проводящими РБО.

Альтернативный подход при создании ВИЛ диапазона длин волн 0.9–1.0 мкм состоит в использовании массивов КТ InGaAs, полученных методом субмонослойного (SML, submonolayer) осаждения, которые обладают существенно более высокой поверхностной плотностью, меньшим неоднородным уширением спектра излучения и большим оптическим усилением [6]. Максимум длины волны излучения определяется толщиной и количеством слоев InAs, толщиной прослоек GaAs, а также количественным соотношением InAs/GaAs, влияющим на высоту трехмерных островков и их эффективную ширину запрещенной зоны [7]. На основе структур с SML КТ были реализованы мощные лазерные диоды,

[¶] E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

работающие в диапазоне длин волн 0.94 мкм [6,7]. В настоящей работе исследуется возможность использования технологии субмонослойного осаждения КТ InGaAs для реализации ВИЛ спектрального диапазона 0.98 мкм с легированными РБО AlGaAs/GaAs.

2. Эксперимент

На рис. 1 представлена конструкция ВИЛ с активной областью на основе SML КТ InGaAs с проводящими полупроводниковыми зеркалами.

Структуры для ВИЛ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на легированных Si подложках GaAs с ориентацией (001) в установке RIBER49. Эпитаксиальная структура состоит из нижнего РБО, содержащего 33 пары четвертьволновых слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As *n*-типа проводимости, нелегированного оптического резонатора из Al_{0.15}Ga_{0.85}As и верхнего РБО, содержащего 20 пар четвертьволновых слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As *p*-типа. В качестве легирующих примесей для получения проводимости *p*- и *n*-типа использовались углерод и кремний соответственно. Для снижения омического сопротивления интерфейсы GaAs–Al_{0.9}Ga_{0.1}As в РБО содержат переходные слои толщиной 10 нм с градиентом по составу Al и высоким уровнем легирования (C — $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, Si — $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Оптический резонатор содержит активную область на основе трех слоев КТ InGaAs, полученных методом субмонослойного осаждения, помещенных в области максимума оптического поля, и апертурный слой *p*-(AlAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As), помещенный в минимум оптического поля для минимизации дифракционных потерь [8]. Толщины и состав слоев структуры рассчитывались для получения резонансной длины волны 980 нм.

Технология изготовления лазерных приборов была основана на ранее разработанном процессе для ВИЛ с непроводящими РБО [9]. Омические контакты к *n*- и *p*-областям формировались напылением и вжиганием (при температуре 450°C) слоев металлизации AuGe/Ni/Au и AuZn соответственно. Далее методом фотолитографии и последующим сухим травлением в пучке ионов Ag⁺ (установка ионного травления MIM TLA 20) были изготовлены мезоструктуры диаметром 36–48 мкм с глубиной травления ~ 3.6 мкм. Маска, устойчивая в ходе длительного процесса сухого травления, основана на использовании фоторезиста ФП-9120. Для устранения поверхностных нарушений, вызванных сухим травлением, проводилось дополнительное химическое травление в растворе NH₄OH:H₂O₂:H₂O (1:2:50) в течение 4–5 с при комнатной температуре. Затем методом латерального селективного окисления слоев AlAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As формировалась токовая апертура диаметром 3–12 мкм. Для обеспечения высокой механической стабильности ВИЛ применялась оптимизированная двухэтапная методика

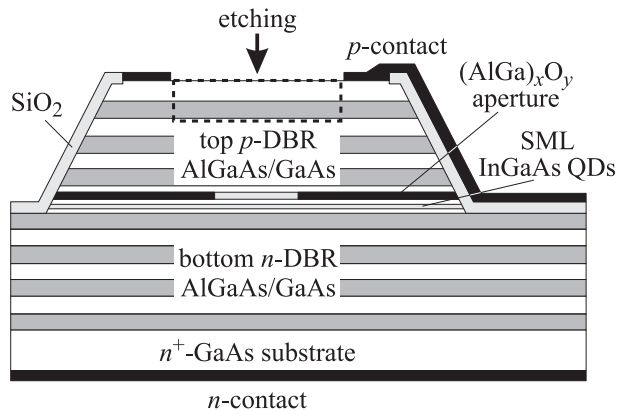


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения структуры вертикально-излучающего лазера с легированными полупроводниковыми распределенными брэгговскими отражателями.

селективного окисления [10]. Чтобы реализовать набор ВИЛ с различным числом пар верхнего РБО, часть слоев верхнего зеркала удалялась в пределах внутреннего диаметра кольцевого *p*-контакта. Следует отметить, что применение метода селективного химического травления в данном случае сильно затруднено вследствие наличия переходных слоев с градиентом по составу Al в РБО. Поэтому для удаления пар слоев верхнего РБО использовалось сухое травление с точностью по глубине не хуже 5%. На завершающем этапе производились пассивация приборной структуры слоем SiO₂ толщиной 0.2 мкм, вскрытие контактных окон и металлизация контактных площадок на основе Cr/Au с общей толщиной слоев 1 мкм.

После проведения измерений мощностных и спектральных характеристик приборов на пластине была отобрана серия образцов ВИЛ, которые напаялись на медные теплоотводы *n*-контактом вниз при помощи индиевого припоя. Лазерные характеристики изготовленных ВИЛ были измерены в импульсном (длительность импульса 200 нс, частота повторений 1 кГц) и непрерывном режимах при комнатной температуре. Ближнее и дальнее поля излучения измерялись в непрерывном режиме с помощью CCD-матрицы.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены вольт-амперная и мощностная характеристики ВИЛ с диаметром токовой апертуры 3 мкм и 18 парами четвертьволновых слоев в верхнем РБО. Наблюдается лазерная генерация в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговым током 0.6 мА, внешней квантовой эффективностью 68% и максимальной выходной мощностью до 4.8 мВт.

Диаграмма направленности выходного излучения рассматриваемого ВИЛ, измеренная в непрерывном режиме при комнатной температуре, вплоть до тока $I = 6 \text{ мА}$

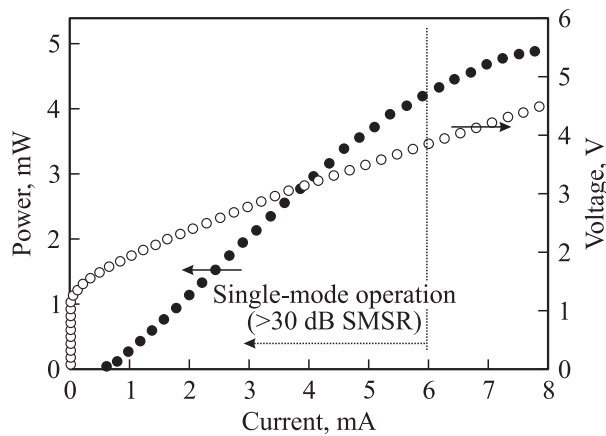


Рис. 2. Вольт-амперная и мощностная характеристики ВИЛ с диаметром токовой апертуры ~ 3 мкм и 18 парами слоев в верхнем РБО в непрерывном режиме работы при комнатной температуре.

представляет собой гауссов пучок с шириной 65° по уровню половины мощности (рис. 3, *a*). Дальнейшее увеличение тока накачки приводит к резкому уширению диаграммы направленности выходного излучения до 14.5° и искажению формы распределения дальнего поля лазерного излучения. Картины ближнего поля, соответствующие одномодовому и многомодовому режимам работы ВИЛ, приведены на вставках к рис. 3, *a*. При токах накачки до 6 мА наблюдается фундаментальная мода (LP_{01}), а при больших токах происходит переключение на поперечную моду первого порядка (LP_{11}).

На рис. 3, *b* показаны спектральные характеристики излучения исследуемого ВИЛ в зависимости от тока накачки. Одномодовая генерация с фактором подавления боковых мод (side mode suppression ratio, SMSR) более 30 дБ сохраняется вплоть до тока 6 мА. При этом максимальная выходная мощность в одномодовом режиме достигает 4 мВт.

Измерения в широком диапазоне температур показали наличие лазерной генерации в непрерывном режиме вплоть до температуры 90°C . При этой температуре приборы с апертурой 3 мкм имеют пороговый ток $I_{th} = 2.1$ мА и максимальную выходную мощность 2.4 мВт. Максимальная мощность в одномодовом режиме с SMSR не менее 30 дБ достигает 2 мВт при рабочем токе 3.8 мА.

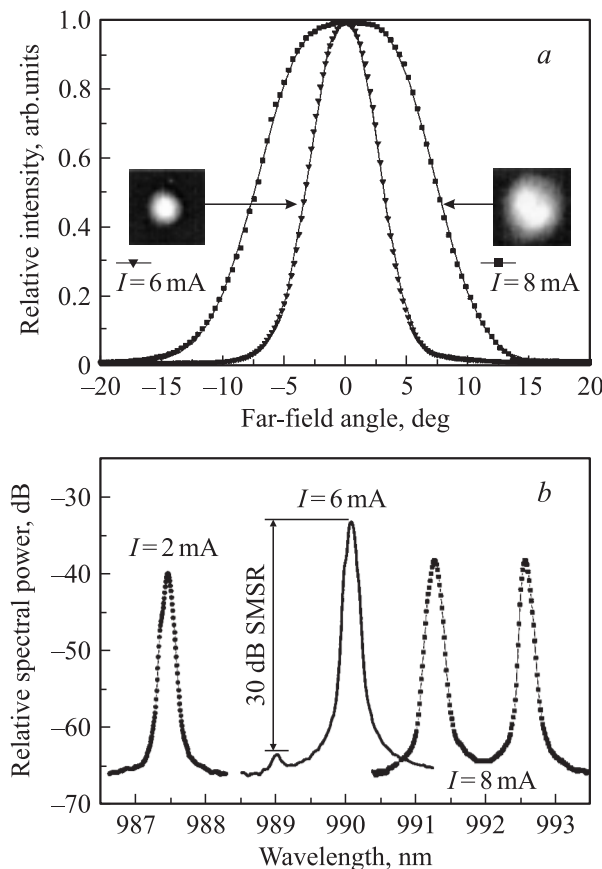


Рис. 3. *a* — угловое распределение мощности излучения ВИЛ в дальнем поле и картины ближнего поля (на вставке) при рабочих токах, соответствующих одномодовому ($I = 6$ мА) и многомодовому ($I = 8$ мА) режимам работы. *b* — спектры генерации ВИЛ при различных рабочих токах. Диаметр токовой апертуры ~ 3 мкм, 18 пар слоев в верхнем РБО. Измерения в непрерывном режиме при комнатной температуре.

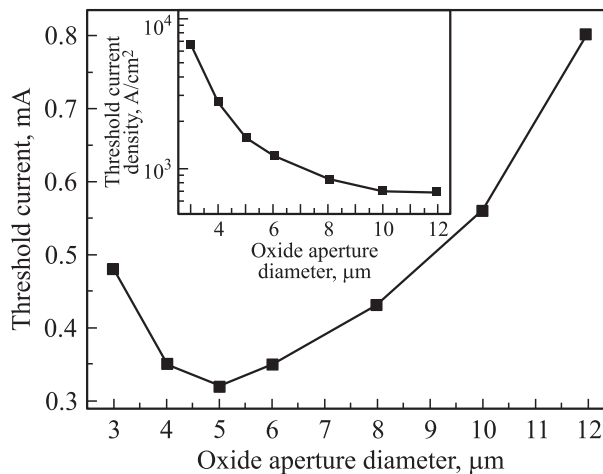


Рис. 4. Пороговый ток как функция размера токовой апертуры для ВИЛ с 20 парами слоев в верхнем РБО. На вставке — плотность порогового тока. Измерения в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Следует отметить, что все изготовленные ВИЛ механически стабильны, хотя для одномодовых приборов с малыми размерами апертуры последовательное сопротивление достигает 350 Ом, что приводит к существенному нагреву лазера при больших рабочих токах и соответствующим механическим напряжениям в структуре.

Одной из важнейших характеристик ВИЛ являются внутренние оптические потери, поскольку от их величи-

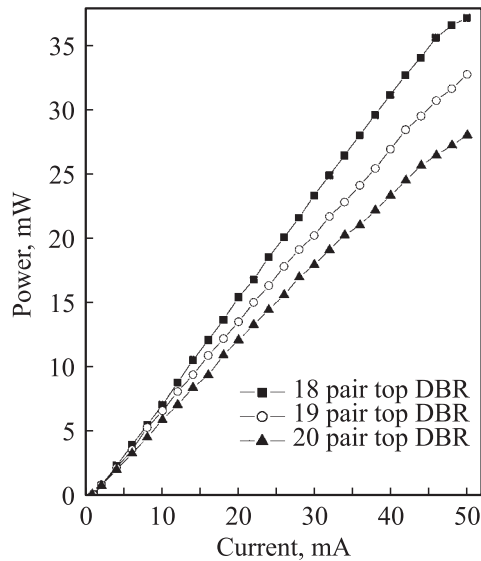


Рис. 5. Мощностные характеристики ВИЛ с диаметром токовой апертуры ~ 12 мкм и с разным числом пар слоев в верхнем РБО: 18 ($I_{th} = 1$ мА, $\eta_{diff} = 64\%$), 19 ($I_{th} = 0.9$ мА, $\eta_{diff} = 60\%$), 20 ($I_{th} = 0.8$ мА, $\eta_{diff} = 50\%$). Измерения в импульсном режиме работы (длительность импульса 0.9 мкс, частота 1 кГц) при комнатной температуре.

ны зависит возможность достижения низких пороговых токов, высокой внешней квантовой эффективности и выходной мощности. В общем случае внутренние потери ВИЛ включают в себя потери внутри центральной (активной) части оптического резонатора, распределенные потери в РБО и оптические потери из-за дифракции на границе токовой апертуры. На рис. 4 приведена зависимость порогового тока от размера токовой апертуры для ВИЛ с 20 парами слоев в верхнем РБО. Следует отметить, что с уменьшением размеров апертуры наблюдается падение порогового тока с 0.8 до 0.32 мА, что связано с увеличением плотности тока накачки. Однако дальнейшее уменьшение диаметра апертуры ведет к резкому возрастанию порога генерации вследствие доминирования дифракционных потерь и различного рода утечек носителей [11]. Поэтому для оценки внутренних потерь использовались структуры ВИЛ с размером апертуры 12 мкм, для которых можно пренебречь дифракционными потерями на апертуре (см. вставку к рис. 4) [12], а модовый характер излучения относительно слабо зависит от тока накачки. На рис. 5 приведены ватт-амперные характеристики для трех ВИЛ с разным числом пар слоев в верхнем (выводном) РБО, измеренные в импульсном режиме. Падение коэффициента отражения с уменьшением числа пар слоев в верхнем РБО приводит к росту максимальной выходной мощности и внешней квантовой эффективности приборов. С другой стороны, увеличение потерь на вывод излучения приводит к росту порогового тока (от 0.8 до 1 мА). Измеренные ватт-амперные характеристики в линейной области хорошо описываются стандартной

зависимостью [13]:

$$P = \frac{\varepsilon \eta_{diff}^T}{q} (I - I_{th}),$$

где P — выходная мощность, I — величина тока накачки, ε — энергия фотона, q — заряд электрона, I_{th} — пороговый ток и η_{diff}^T — внешняя квантовая эффективность излучения, выводимого через верхнее зеркало. Однако в случае ВИЛ следует учесть, что коэффициенты отражения верхнего и нижнего РБО различны. Поэтому внешняя квантовая эффективность определяется следующими выражениями [14]:

$$\eta_{diff}^T = \eta_{diff} \frac{\sqrt{R_T}}{\sqrt{R_T} + \sqrt{R_B}} \frac{1 - R_T}{1 - \sqrt{R_T R_B}},$$

$$\eta_{diff} = \eta_{int} \frac{T_m}{A_{int} + T_m},$$

где R_T и R_B — коэффициенты отражения верхнего (выводного) и нижнего РБО, η_{diff} — полная внешняя

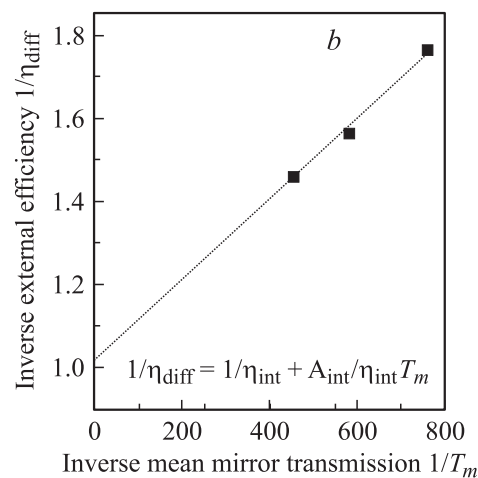
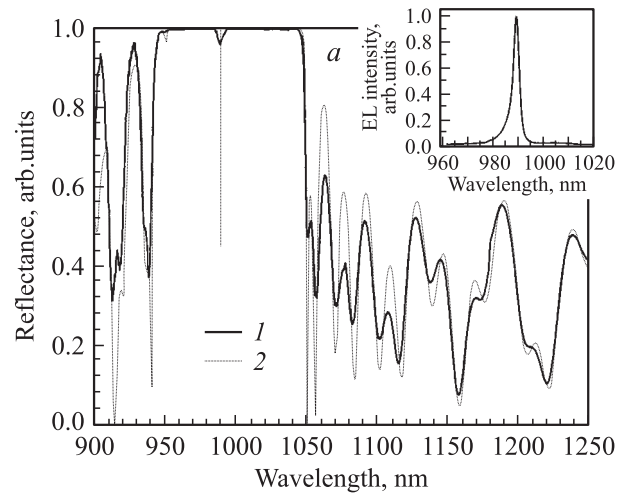


Рис. 6. *a* — измеренный (1) и расчетный (2) спектры отражения эпитаксиальной структуры; на вставке — спектр электролюминесценции (EL); *b* — зависимость обратной внешней квантовой эффективности от обратного среднего коэффициента пропускания зеркал.

квантовая эффективность, A_{int} — внутренние оптические потери на один проход фотона, η_{int} — внутренняя квантовая эффективность, $T_m = \ln(1/\sqrt{R_T R_B})$ — средний коэффициент пропускания зеркал. Для того чтобы определить коэффициенты отражения зеркал на резонансной длине волны, необходимо с высокой точностью знать толщины и состав всех слоев структуры. С этой целью были измерены спектры оптического отражения эпитаксиальной структуры ВИЛ в геометрии нормального падения (см. рис. 6, а). Для более точного определения резонансной длины волны были измерены спектры электролюминесценции с поверхности структуры ВИЛ. Затем путем итерационной подгонки расчетных спектров отражения к экспериментальным данным были определены толщины слоев с точностью не хуже чем 0.5%. При этом для численного моделирования спектров отражения использовался метод матриц переноса [15]. На рис. 6, б представлена измеренная зависимость обратной внешней квантовой эффективности η_{diff}^{-1} от обратного коэффициента пропускания зеркал T_m^{-1} . Ее линейная аппроксимация с последующей экстраполяцией дает величины внутренней квантовой эффективности $\eta_{\text{int}} = 98\%$ и внутренних оптических потерь $A_{\text{int}} = 0.09\%$ на один проход фотона. Достигнутый уровень внутренних оптических потерь ниже, чем наименьшие опубликованные значения для ВИЛ с проводящими зеркалами [16], и лишь незначительно уступает рекордно низким потерям для ВИЛ с внутриврезонансными контактами [17].

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены структуры ВИЛ с активной областью на основе массивов субмонослойных КТ InGaAs и двумя легированными РБО AlGaAs/GaAs. Изготовлены и исследованы одномодовые ВИЛ спектрального диапазона 980 нм с диаметром оксидированной токовой апертуры 3 мкм. Приборы имеют субмиллиамперные пороговые токи, максимальную выходную мощность до 4 мВт в одномодовом режиме и внешнюю дифференциальную эффективность более 65%. Проведено экспериментальное исследование зависимости характеристик приборов от числа пар четвертьволновых слоев в верхнем РБО для многомодовых приборов с размером апертуры 10–12 мкм. Обнаружено, что ВИЛ на основе массивов субмонослойных КТ InGaAs обладают сверхнизкими внутренними оптическими потерями (0.09% на один проход фотона).

Работа была выполнена при поддержке программы Отделения физических наук РАН „Новые материалы и структуры“, программы фундаментальных исследований президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“, Федерального агентства по науке и инновациям, РФФИ и проекта SANDiE (NMP4-CT-2004-500101).

Список литературы

- [1] C.W. Wilmsen, H. Temkin, L.A. Coldren. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Cambridge University Press, 1999).
- [2] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Y. Egorov, N.A. Maleev. *Quantum dot lasers* (Oxford University Press, 2003).
- [3] V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov. *Phys. Status Solidi A*, **202**, 396 (2005).
- [4] 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).
- [5] J.K. Kim, R.L. Naone, L.A. Coldren. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **6**, 504 (2000).
- [6] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhurin, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, D.A. Livshits, I.S. Tarasov, D.A. Bedarev, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, I.P. Soshnikov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **35**, 1845 (1999).
- [7] S.S. Mikhurin, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, D.A. Livshits, N.A. Maleev, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, *Zh.I. Alferov. 26th Int. Conf. Phys. Semicond.* (Edinburgh, UK, 2002) paper L2.3.
- [8] A. Bond, P.D. Dapkus, J.D. O'Brien. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 13 627 (1998).
- [9] 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.А. 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).
- [10] С.А. Блохин, А.Н. Смирнов, А.В. Сахаров, А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, Д.А. Бедарев, Е.В. Никитина, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. *ФТП*, **39**, 782 (2005).
- [11] P.D. Floyd, B.J. Thibeault, E.R. Hegblom, J. Ko, L.A. Coldren, J.L. Merz. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, 590 (1996).
- [12] E.R. Hegblom, D.I. Babic, B.J. Thibeault, L.A. Coldren. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1757 (1996).
- [13] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981).
- [14] T. Makino, J.D. Evans, G. Mak. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2871 (1997).
- [15] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1970).
- [16] M. Jungo, F.M. di Sopra, D. Erni, W. Baechtold. *J. Appl. Phys.*, **91**, 5550 (2002).
- [17] G.M. Yang, M.H. MacDugal, V. Pudikov, P.D. Dapkus. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 1228 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Sub-monolayer quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers

S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov,
Yu.M. Shernyakov, I.I. Novikov, N.Yu. Gordeev,
G.S. Sokolovskii, V.V. Dudelev, V.I. Kuchinskii,
M.M. Kulagina, M.V. Maximov, V.M. Ustinov,
A.R. Kovsh*, S.S. Mikhrin*, N.N. Ledentsov*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* NL-Nanosemiconductors GmbH,
44227 Dortmund, Germany

Abstract Vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) based on sub-monolayer InGaAs quantum-dot active region and doped AlGaAs/GaAs distributed Bragg reflectors were grown by molecular beam epitaxy. $3\ \mu\text{m}$ aperture single-mode VCSELs demonstrate lasing at 980 nm with threshold current of 0.6 mA, maximum output power of 4 mW and external differential efficiency as high as 68%. Ultimately low internal optical losses (0.09% per one pass) were measured for 10–12 μm aperture multi-mode sub-monolayer quantum dot VCSELs.