

# Использование пространственно упорядоченных массивов травленых отверстий для создания одномодовых вертикально излучающих лазеров на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек

© А.Г. Кузьменков<sup>×¶</sup>, С.А. Блохин<sup>+</sup>, Н.А. Малеев<sup>+</sup>, А.В. Сахаров<sup>+</sup>, В.Г. Тихомиров<sup>#</sup>, М.В. Максимов<sup>+</sup>, В.М. Устинов<sup>×</sup>, А.Р. Ковш<sup>\*</sup>, С.С. Михрин<sup>\*</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>+◇</sup>, H.P.D. Yang<sup>■</sup>, G. Lin<sup>■</sup>, R.S. Hsiao<sup>■</sup>, J.Y. Chi<sup>■</sup>

<sup>×</sup> Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр Российской академии наук, 195220 Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>#</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет („ЛЭТИ“), 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> NL-Nanosemiconductors GmbH, 44227 Dortmund, Germany

<sup>◇</sup> Institute for Solid State Physics, Technical University of Berlin, D-10623 Berlin, Germany

<sup>■</sup> Industrial Technology Research Institute, Chutung, Taiwan, Republic of China

(Получена 9 ноября 2006 г. Принята к печати 20 февраля 2007 г.)

Для подавления генерации мод высокого порядка в вертикально излучающих лазерах на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек применен метод формирования пространственно-упорядоченного массива протравленных отверстий в верхнем распределенном брэгговском отражателе. Продемонстрированы одномодовые вертикально излучающие лазеры спектрального диапазона 990 нм с диаметром токовой апертуры 20 мкм, пороговым током 0.9 мА и максимальной выходной мощностью до 3.8 мВт при комнатной температуре. Одномодовая генерация с коэффициентом подавления боковых мод более 35 дБ сохраняется во всем диапазоне токов накачки. Уменьшение токовой оксидной апертуры до размеров, близких к оптической апертуре, приводит к увеличению внешней квантовой эффективности, однако при этом наблюдается переход к многомодовому режиму генерации при больших токах накачки.

PACS: 42.55.Px, 85.60.Jb, 81.07.Ta

## 1. Введение

Полупроводниковые вертикально излучающие лазеры (ВИЛ, vertical-cavity surfaceemitting lasers) являются перспективным классом источников оптического излучения. Основными преимуществами ВИЛ по сравнению с традиционными инжекционными лазерными диодами плосковой геометрии являются более узкая и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, высокая температурная стабильность длины волны лазерного излучения, повышенная радиационная стойкость, а также возможность групповой технологии изготовления и измерения основных приборных характеристик непосредственно на полупроводниковой пластине [1]. Перечисленные достоинства ВИЛ делают их чрезвычайно привлекательными для применения в системах оптической записи и хранения информации, в системах оптической связи, в прецизионных датчиках перемещения и лазерных принтерах, а также идеальными компактными источниками возбуждения для систем спектроскопии. В последнее время ведутся интенсивные исследования по созданию ВИЛ с активными областями на основе самоорганизующихся массивов квантовых точек (КТ), которые потенциально позволяют реализовать

приборы со сверхнизкими оптическими потерями и малыми размерами излучающей области [2].

В целом ряде применений требуется реализовать стабильную одномодовую генерацию ВИЛ. Для латерального ограничения активной (излучающей) области прибора (области протекания тока) в современных конструкциях ВИЛ широко используются токовые апертуры, полученные с помощью изолирующей имплантации протонов [3] или селективным окислением скрытых слоев AlGaAs с высоким содержанием Al (> 95%) [4]. Оба метода принципиально позволяют получить одномодовые лазеры, однако по мере роста тока накачки для них характерен переход к генерации на высших модах. ВИЛ с селективно-окисленными апертурами обеспечивают малые значения пороговых токов и низкий уровень оптических потерь, однако реализация режима одномодовой генерации требует малых размеров активной (излучающей) области прибора (т.е. малых токовых апертур, типично менее 3–4 мкм). Это обусловлено существенным отличием показателей преломления для окисленных апертурных слоев ( $n_{Al_2O_3} \approx 1.6$ ) и исходных слоев эпитаксиальной структуры ( $n_{GaAs} \approx 3.5$ ,  $n_{AlAs} \approx 3.0$  при длине волны  $\lambda = 980$  нм), в результате чего возникает заметный скачок эффективного показателя преломления между центральной (неокисленной) и прилегающими областями приборной структуры. Требования малого

<sup>¶</sup> E-mail:kuzmenkov@mail.ioffe.ru

размера оксидной апертуры приводят к резкому увеличению электрического и теплового сопротивления и, как следствие, ограничивают предельный уровень выходной мощности. Использование ВИЛ с большим размером активной области позволяет существенно повысить выходную мощность, но в то же время приводит к появлению мод высокого порядка вследствие ухудшения пространственного ограничения и неоднородности инжекции носителей.

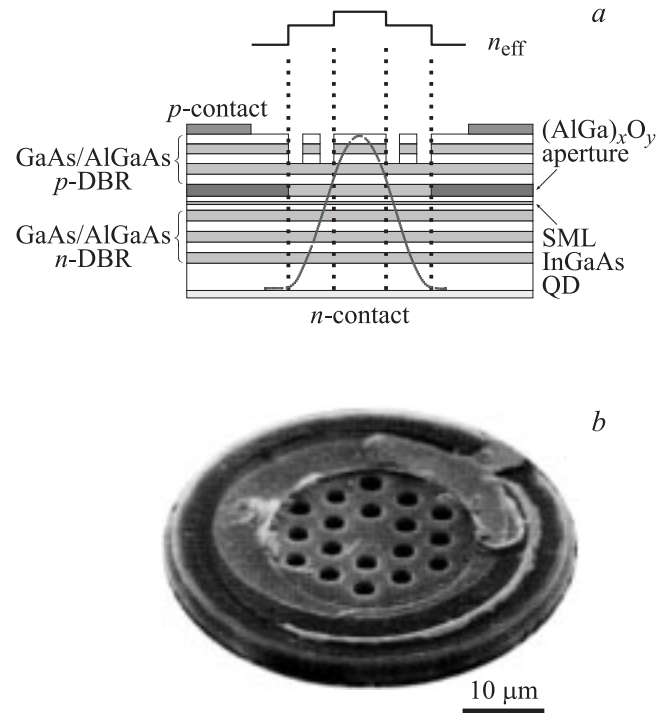
Для преодоления указанной проблемы были предложены различные методы подавления мод высокого порядка в структурах ВИЛ: применение металлической апертуры [5], связанных микрорезонаторов [6], использование раздельных токовой и оптической апертур [7], внесение селективных потерь с помощью диффузии цинка [8], формирование волновода с антирезонансным отражением [9]. Однако одномодовые ВИЛ, реализованные с применением перечисленных методов, обладали различными недостатками: высокое последовательное сопротивление, относительно низкая механическая стабильность, высокие пороговые токи, относительно высокая расходимость излучения и сложность технологического процесса изготовления.

Одним из наиболее перспективных способов подавления генерации мод высшего порядка в изначально многомодовом ВИЛ с большой токовой апертурой является создание неоднородного в латеральном направлении профиля эффективного показателя преломления с помощью локального травления слоев верхнего распределенного брэгговского отражателя (РБО) на заданную глубину [10,11]. На практике широко используется пространственная конфигурация отверстий, аналогичная полупроводниковым структурам с фотонными кристаллами (ФК), в результате чего для таких приборов часто используется название „ВИЛ со структурой ФК“. Однако следует отметить, что физических эффектов, аналогичных реальным структурам с ФК, в данном случае не возникает [12].

В настоящей работе исследуется возможность реализации одномодовых ВИЛ на основе массивов субмонослойных InGaAs квантовых точек (КТ) за счет модуляции эффективного показателя преломления путем формирования массива протравленных отверстий в верхнем РБО.

## 2. Конструкция прибора

Схематическое сечение исследуемых ВИЛ представлено на рис. 1, *a*. Пространственное ограничение тока в латеральном направлении обеспечивается апертурой, полученной селективным окислением. Центральная область прибора окружена регулярной структурой протравленных отверстий с диаметром  $a$ , расположенных в гексагональной геометрии с периодом  $\Lambda$ . Как отмечалось выше, несмотря на наличие регулярной структуры травленных отверстий, в нашем случае для оптической



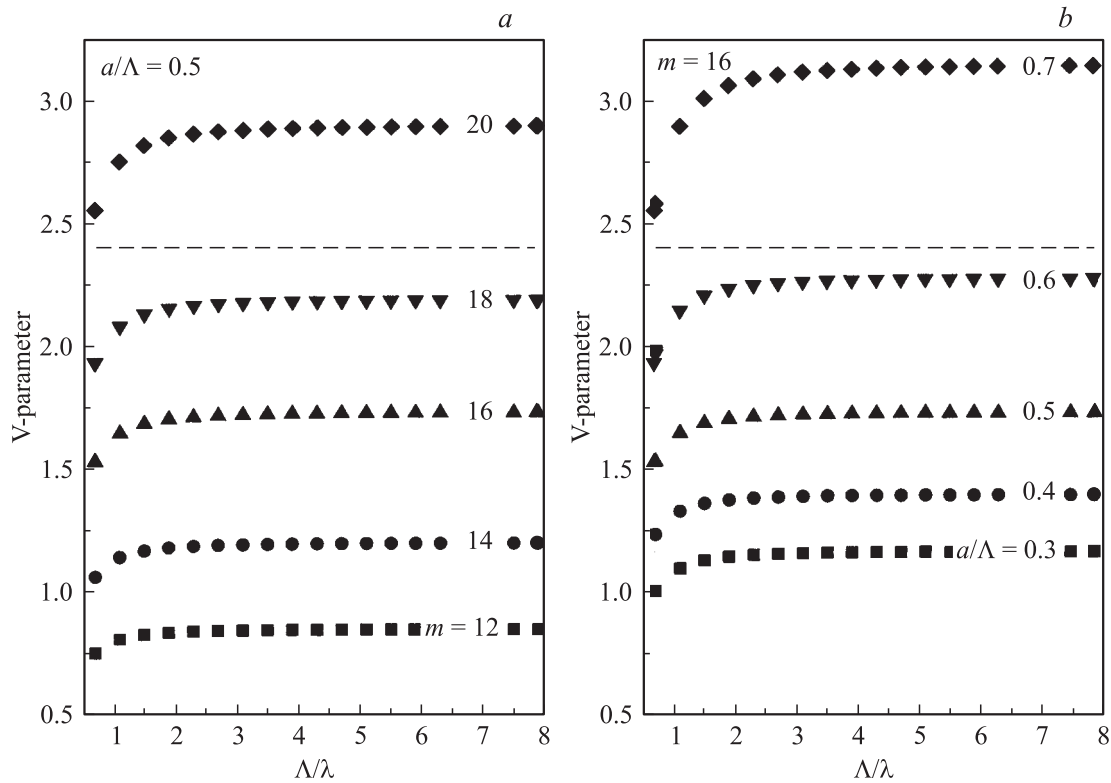
**Рис. 1.** Схематическое изображение поперечного сечения структуры (*a*) и изображение, полученное с помощью растровой электронной микроскопии (*b*), вертикально излучающего лазера с массивом протравленных отверстий в верхнем распределенном брэгговском отражателе.

волны, распространяющейся в латеральном направлении, фотонная зона не образуется [12]. В то же время наличие протравленных отверстий вокруг центральной области прибора обеспечивает скачок эффективного показателя преломления  $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}}$  и формирование волновода в направлении, перпендикулярном плоскости эпитаксиальной структуры ВИЛ (см. рис. 1, *a*). Варьируя топологию пространственного рисунка и глубину травления отверстий, можно добиться существования в ВИЛ только одной фундаментальной моды.

$V$ -параметр, характеризующий число мод, поддерживаемых цилиндрическим оптическим волноводом, можно записать как [13]

$$V = \pi \frac{D}{\lambda} \sqrt{n_{\text{eff1}}^2 - n_{\text{eff2}}^2}, \quad (1)$$

где  $D$  — эффективный диаметр сердцевины волновода,  $n_{\text{eff1}} = 3.319$  — эффективный показатель преломления исходной структуры ВИЛ,  $n_{\text{eff2}}$  — эффективный показатель преломления структуры ВИЛ с массивом протравленных отверстий, сформированным в верхнем РБО,  $\lambda$  — резонансная длина волны ВИЛ (в нашем случае  $\sim 0.98$  мкм). Отметим, что если величина  $V$ -параметра меньше 2.4, то соответствующий оптический волновод является одномодовым. Величина  $n_{\text{eff2}}$  может быть найдена в рамках модели эффективного волновода, изложенной в работе [12]. Отметим, что увеличение  $a$  или уменьшение  $\Lambda$  приводит к существенному



**Рис. 2.** Влияние: *a* — глубины травления РБО (число протравленных пар  $m$ ) и *b* — величины отношения диаметра отверстий к периоду их расположения ( $a/\Lambda$ ) — на зависимость  $V$ -параметра от нормированного на длину волны периода расположения травленных отверстий ( $\Lambda/\lambda$ ).

изменению эффективного коэффициента преломления структуры. В то же время высокие значения  $a/\Lambda$  связаны со значительными оптическими потерями в результате дифракции на отверстиях. Более того, величина  $n_{\text{eff}2}$  зависит также и от глубины травления отверстий. Однако особенности технологии, в частности ограничения на глубину травления при сохранении вертикальных стенок, лимитируют минимально достижимые значения геометрических параметров упорядоченного массива травленных отверстий ( $\Lambda > 3$  мкм и  $a/\Lambda > 0.3$ ).

На рис. 2 представлена зависимость  $V$ -параметра от нормированного на длину волны периода упорядоченного массива травленных отверстий  $\Lambda/\lambda$  при различных параметрах (величины  $a/\Lambda$  и глубины травления). Отметим, что  $V$ -параметр увеличивается как с ростом величины  $a/\Lambda$ , так и с ростом глубины травления, что в итоге приводит к нарушению условия одномодовости оптического волновода. Кроме того, чтобы обеспечить эффективное подавление генерации мод высокого порядка, контраст эффективного показателя преломления сформированного волновода должен быть существенно больше, чем локальное изменение коэффициента преломления, обусловленное тепловыми эффектами (т. е.  $V > 0.5$ ) [14]. Оценки показывают, что для обеспечения эффективной однородной инжекции носителей в активную область, минимизации оптических потерь, обусловленных рассеянием и безызлучательной реком-

бинацией носителей на стенках травленных отверстий, а также обеспечения приемлемого последовательного сопротивления прибора, глубина травления не должна превышать 80% от общей толщины верхнего РБО.

С учетом вышеизложенного для реализации одно-модовых ВИЛ использовалась гексагональная решетка протравленных отверстий с периодом  $\Lambda = 5$  мкм, диаметром  $a = 0.5\Lambda$  и одиночным дефектом с эффективным диаметром  $D \approx 2\Lambda - a = 8$  мкм при глубине травления верхнего РБО порядка 2.4 мкм (16 пар). Для такой структуры рассчитанное в рамках модели [12] значение  $V$ -параметра не превышает 1.7.

### 3. Эксперимент

Исследуемые структуры ВИЛ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на легированных Si подложках GaAs с ориентацией (001) в установке RIBER 49. Эпитаксиальная структура состоит из нижнего РБО, содержащего 33 пары четвертьволновых слоев GaAs/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$   $n$ -типа, нелегированного  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  оптического резонатора с толщиной, равной резонансной длине волны, и верхнего РБО, содержащего 20 пар четвертьволновых слоев GaAs/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$   $p$ -типа и непосредственно примыкающий к оптическому резонатору апертурный слой  $p$ -( $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ ). Для уменьшения последовательного сопротивления РБО при

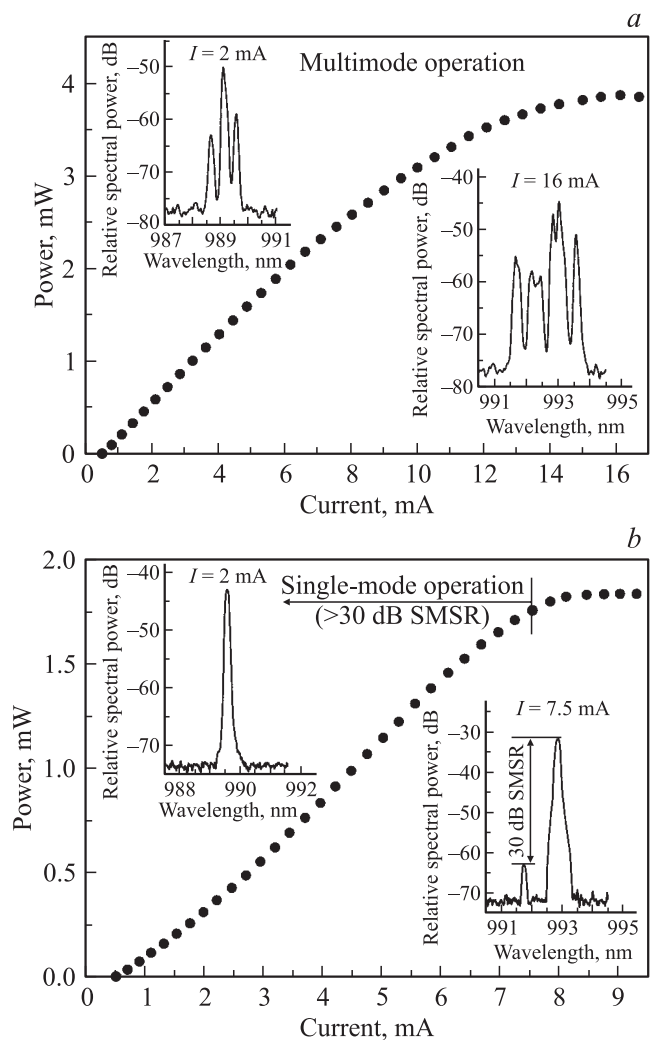
сохранении низких оптических потерь использовались неоднородный профиль легирования и градиентное изменение состава на границах четвертьволновых слоев [15]. В качестве активной области использовались три слоя InGaAs квантовых точек (КТ), полученных методом субмонослойного (СМ, sub-monolayer) осаждения [16], помещенные в центре оптического резонатора. Толщины и состав слоев структуры рассчитывались для получения длины волны генерации вблизи 980 нм.

На первом этапе изготовления приборной структуры методом плазмохимического травления были изготовлены цилиндрические меза-структуры диаметром 44 и 50 мкм с глубиной травления порядка 3.6 мкм. Для латерального ограничения тока в активной области с помощью селективного окисления слоя  $p$ -(AlAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As) были сформированы токовые апертюры диаметром 11 и 20 мкм. После этого были сформированы верхние кольцевые омические контакты  $p$ -типа на основе TiPtAu и сплошной омической контакт  $n$ -типа на основе AuGe-Ni-Au со стороны подложки. Затем с помощью плазмохимического травления верхнего РБО на глубину порядка 16 пар на поверхности структуры был сформирован упорядоченный двумерный массив (гексагональная решетка) отверстий с одиночным дефектом в центре излучающей области ВИЛ (см. рис. 1, *b*). Вольт-амперные, мощностные и спектральные характеристики изготовленных приборов были измерены непосредственно на пластине в непрерывном режиме при комнатной температуре.

#### 4. Результаты и обсуждение

Мощностные и спектральные характеристики исходного (без массива протравленных отверстий) СМ КТ ВИЛ с диаметром токовой апертюры 11 мкм представлены на рис. 3, *a*. Прибор демонстрирует лазерную генерацию в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговым током 0.5 мА, внешней квантовой эффективностью 30% и максимальной выходной мощностью 3.9 мВт. СМ КТ ВИЛ работают в многомодовом режиме генерации сразу при превышении порогового тока, при этом спектр излучения таких ВИЛ сильно уширен (~ 2 нм).

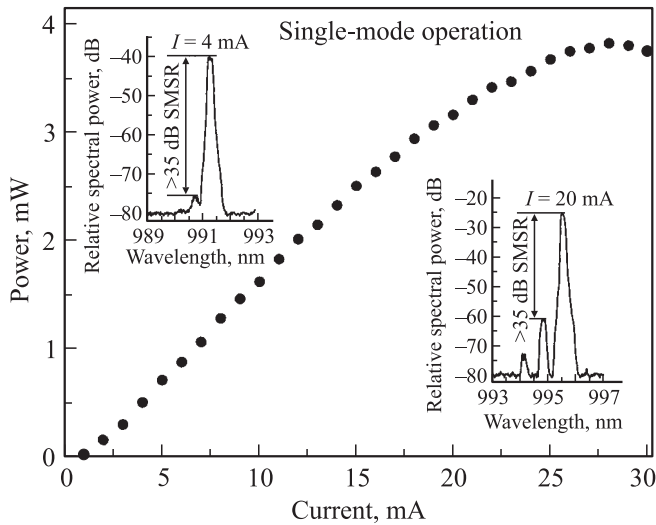
Травление пространственно-упорядоченного массива отверстий в верхнем зеркале приводит к формированию эффективного волновода и существенному изменению модового характера излучения приборов. На рис. 3, *b* показаны спектральные и мощностные характеристики СМ КТ ВИЛ с массивом протравленных отверстий в верхнем РБО. Приборы с размером токовой апертюры 11 мкм имеют пороговый ток 0.53 мА при внешней квантовой эффективности 22%. При малых токах накачки (менее 7 мА) наблюдается фундаментальная мода (LP<sub>01</sub>), а при больших токах происходит переключение на поперечную моду 1-го порядка (LP<sub>11</sub>). Одномодовая генерация с коэффициентом подавления боковых мод (ФПБМ, SMSR) более 30 дБ сохраняется вплоть до



**Рис. 3.** Мощностные и спектральные (на вставках) характеристики для СМ КТ ВИЛ с диаметром токовой апертюры 11 мкм (*a*) и характеристики аналогичного прибора с массивом протравленных отверстий в верхнем распределенном брэгговском отражателе (*b*).

тока накачки 7.5 мА. При этом максимальная выходная мощность в одномодовом режиме достигает 1.8 мВт. Однако следует отметить, что в результате травления массива отверстий наблюдается значительное увеличение последовательного сопротивления ВИЛ по сравнению с исходной приборной структурой (от 190 до 340 Ом), что связано с частичным блокированием путей инжекции тока в активную область.

Увеличение токовой оксидной апертюры до 20 мкм позволяет получить стабильную одномодовую генерацию с ФПБМ более 35 дБ во всем диапазоне токов накачки в СМ КТ ВИЛ с массивом протравленных отверстий в верхнем РБО (рис. 4). Благодаря увеличенному размеру токовой апертюры приборы обладают более низкими последовательным и тепловым сопротивлениями, 125 Ом и 1000 К/Вт соответственно. В результате максимальная выходная мощность в одномодовом



**Рис. 4.** Мощностная и спектральные (на вставках) характеристики СМ КТ ВИЛ с массивом протравленных отверстий в верхнем распределенном брэгговском отражателе и 20 мкм токовой апертурой.

режиме достигает 3.8 мВт и ограничена саморазогревом активной области. Однако вследствие увеличения оптических потерь на рассеяние на границах протравленных отверстий и токов утечки, а также уменьшения плотности тока в активной области (при увеличении размера апертуры) наблюдается резкое падение внешней квантовой эффективности до 15%.

Для оценки разности эффективных показателей преломления между центральной областью прибора и прилегающей областью с массивом травленных отверстий были измерены спектры электролюминесценции для двух расположенных в непосредственной близости ВИЛ с диаметром токовой апертуры около 30 мкм, один из которых не имел структуры травленных отверстий, а другой имел массив протравленных отверстий в верхнем РБО. Спектры измерялись при токах накачки, меньших порога генерации.

Для ВИЛ со структурой травленных отверстий наблюдался коротковолновый сдвиг положения максимума спектра электролюминесценции, соответствующего фундаментальной моде оптического микрорезонатора, на величину  $\sim 0.3$  нм. Этот сдвиг обусловлен влиянием массива травленных отверстий в верхнем РБО. В случае ВИЛ изменение резонансной длины волны связано с профилем эффективного показателя преломления структуры ВИЛ выражением [17]:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff1}}} = \frac{n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}}}{n_{\text{eff1}}} \approx \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (2)$$

Расчетное значение эффективного показателя преломления для исходной эпитаксиальной структуры  $n_{\text{eff1}} = 3.319$ . В результате для структуры ВИЛ с массивом протравленных отверстий в верхнем РБО по-

лучаем величину эффективного показателя преломления  $n_{\text{eff1}} = 3.318$  и соответственно величину скачка эффективного показателя преломления  $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}} = 3 \cdot 10^{-4}$ . Необходимо отметить, что оцененное значение  $\Delta n_{\text{eff}}$  существенно меньше характерных значений для ВИЛ, в которых латеральное профилирование эффективного показателя преломления структуры обеспечивается за счет волноводного эффекта оксидной токовой апертуры [1,18].

По сравнению с рассмотренными выше приборами с массивом протравленных отверстий в верхнем РБО изготовленные из той же эпитаксиальной структуры одномодовые СМ КТ ВИЛ традиционной конструкции с диаметром оксидной токовой апертуры 3 мкм обладают большей внешней квантовой эффективностью 50%, при максимальной выходной мощности более 3 мВт [15,19]. В то же время они обладают высокими последовательным и тепловым сопротивлениями, 350 Ом и 2700 К/Вт соответственно, что ограничивает максимальную выходную мощность. Таким образом, основными преимуществами ВИЛ с массивом протравленных отверстий в верхнем РБО по сравнению с традиционным одномодовым ВИЛ являются существенно меньшие последовательные и тепловые сопротивления. Это позволяет получить несколько большую выходную мощность в одномодовом режиме, несмотря на меньшую внешнюю квантовую эффективность.

Для ВИЛ с пространственно упорядоченным массивом протравленных отверстий сформированным в верхнем РБО, главным фактором, лимитирующим максимальную выходную мощность в одномодовом режиме генерации, является эквивалентный размер сердцевинки возникающего эффективного волновода — оптической апертуры. Оптимизация размеров оптической и токовой апертур, а также контраста эффективного волновода (за счет уменьшения глубины травления) может существенно улучшить лазерные характеристики одномодовых приборов такого типа.

## 5. Заключение

В настоящей работе экспериментально апробирован метод подавления генерации мод высокого порядка в ВИЛ на основе СМ КТ InGaAs путем формирования пространственно упорядоченного массива протравленных отверстий в верхнем РБО. С помощью метода эффективного показателя преломления определены параметры приборной структуры, соответствующие режиму одномодового эффективного волновода. Вертикально излучающие лазеры с субмонослойными InGaAs-квантовыми точками в качестве активной области и оксидной токовой апертурой диаметром 20 мкм, сформированные с применением рассмотренной технологии, продемонстрировали одномодовую и одночастотную генерацию с максимальной выходной оптической мощностью 3.8 мВт и коэффициентом подавления боковых мод более 35 дБ во всем диапазоне токов накачки. В случае

размеров оптической апертуры, близких к диаметру токовой апертуры, возникает более сильное оптическое ограничение, что приводит к увеличению дифференциальной эффективности. Однако при этом максимальная выходная оптическая мощность фундаментальной моды ограничивается возникновением генерации мод высокого порядка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проектов SANDiE (NMP4-CT-2004-500101), Nanophotonics Project (MOEA, Taiwan), Государственного контракта № 02.442.11.7566 (от 06.03.06), Научной программы СПб НЦ РАН, программы фундаментальных исследований президиума РАН „Квантовые наноструктуры“.

Авторы благодарны В.М. Бусову и С.И. Трошкову за исследования структур методом растровой электронной микроскопии. С.А. Блохин выражает благодарность за финансовую поддержку по гранту для молодых кандидатов наук Санкт-Петербурга (PD07-1.2-59).

## Список литературы

- [1] C.W. Wilmsen, H. Temkin, L.A. Coldren. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Cambridge University Press, 1999).
- [2] V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov. *Phys. Status Solidi A*, **202**, 396 (2005).
- [3] K. Tai, R.J. Fischer, K.W. Wang, S.N.G. Chu, A.Y. Cho. *Electron. Lett.*, **25**, 1644 (1989).
- [4] K.D. Choquette, H.Q. Hou. *Proc. IEEE*, **85**, 1730 (1997).
- [5] N. Ueki, A. Sakamoto, T. Nakamura, H. Nakayama, J. Sakurai, H. Otoma, Y. Miyamoto, M. Yoshikawa, M. Fuse. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **11**, 1539 (1999).
- [6] A.J. Fischer, K.D. Choquette, W.W. Chow, A.A. Alleman, K.M. Geib. *Proc. 136<sup>th</sup> Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, November 15–16, 2000 (Pueirts Rico, USA) p. 802.
- [7] T.H. Hsueh, H.C. Kuo, F.I. Lai, L.H. Lai, S.C. Wang. *Electron. Lett.*, **39**, 1519 (2003).
- [8] C.C. Chen, S.J. Liaw, Y.J. Yang, Y.C. Yu, C.Y. Lin. *Optical Fiber Commun. Conf.*, 151 (2002).
- [9] D. Zhou, L.J. Mawst. *IEEE J. Quant. Electron.*, **38**, 1599 (2002).
- [10] H.J. Unold, M. Grabherr, F. Eberhard, F. Mederer, R. Jager, M. Riedl, K.J. Ebeling. *Electron. Lett.*, **35**, 1340 (1999).
- [11] D.S. Song, S.H. Kim, H.G. Park, C.K. Kim, Y.H. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 3901 (2002).
- [12] N. Yokouchi, A.J. Danner, K.D. Choquette. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **9**, 1439 (2003).
- [13] G.P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems* (N.Y., Wiley, 1997).
- [14] A.J. Danner, J.J. Raftery, jr., N. Yokouchi, K.D. Choquette. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1031 (2004).
- [15] 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. *ФТП*, **40**, 633 (2006).
- [16] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, D.S. 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).
- [17] G.R. Hadley. *Optics Lett.*, **20**, 1483 (1995).
- [18] V. Bardinal, L. Averseng, C. Bringer, T. Camps, J. Polesel-Mariss, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, C. Vergne-negre, A. Muñoz-Yagüe. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1771 (2002).
- [19] S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.V. Sakharov, M.M. Kulagina, Y.M. Shernyakov, I.I. Novikov, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, N.N. Ledentsov, G. Lin, J.Y. Chi. *IEEE J. Quant. Electron.*, **42**, 849 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

## Regular etched-hole arrays application for single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with sub-monolayer InGaAs quantum dot active region

A.G. Kuzmenkov<sup>×</sup>, S.A. Blokhin<sup>+</sup>, N.A. Maleev<sup>+</sup>, A.V. Sakharov<sup>+</sup>, V.G. Tikhomirov<sup>#</sup>, M.V. Maximov<sup>+</sup>, V.M. Ustinov<sup>×</sup>, A.R. Kovsh<sup>\*</sup>, S.S. Mikhlin<sup>\*</sup>, N.N. Ledentsov<sup>+ , ◊</sup>, H.P.D. Yang<sup>■</sup>, G. Lin<sup>■</sup>, R.S. Hsiao<sup>■</sup>, J.Y. Chi<sup>■</sup>

<sup>×</sup> St. Petersburg Physics and Technology Centre for Research and Education of the Russian Academy of Sciences,

195220 St. Petersburg, Russia

<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute

Russian Academy of Science,

194021 St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup> St. Petersburg Electrotechnical University,

197376 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup> NL-Nanosemiconductors GmbH,

44227 Dortmund, Germany

<sup>◊</sup> Institute for Solid State Physics,

Technical University of Berlin,

D-10623 Berlin, Germany

<sup>■</sup> Industrial Technology Research Institute,

Chutung, Taiwan, Republic of China

**Abstract** Regular 2D etched hole array was formed in upper distributed Bragg reflector for higher-order mode suppression in vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) based on sub-monolayer (SML) InGaAs quantum dots (QDs). A 990 nm single mode VCSELs with 20 μm current aperture, threshold current of 0.9 mA and maximum output power of 3.8 mW at room temperature have been demonstrated. Single mode operation with side mode suppression factor more than 35 dB was obtained over all current range. Reduction in the size of oxidized current aperture (up to effective optical aperture size) leads to increasing in the external quantum efficiency, but simultaneously gives rise to multimode operation at the high current level.