

# Вертикальные микрорезонаторы на 1.3 мкм с InAs/InGaAs-квантовыми точками и приборы на их основе

© А.В. Сахаров, И.Л. Крестников, Н.А. Малеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, D. Bimberg\*, J.A. Lott†, Ж.И. Алфёров

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

\* Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany

† Air Force Institute of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering,  
Wright-Patterson AFB, Ohio, USA 45433

(Получена 29 декабря 2000 г. Принята к печати 10 января 2001 г.)

Теоретически и экспериментально исследованы различные варианты структур с оптическими микрорезонаторами и активными слоями на основе квантовых точек InGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs. Реализованы светодиоды диапазона 1.3 мкм, обладающие узкой спектральной характеристикой и низкой расходимостью светового пучка. В структуре с оксидированными зеркалами AlO/GaAs получена лазерная генерация в вертикальном направлении на длине волны 1.3 мкм при инжекционной накачке.

## 1. Введение

В последние годы светоизлучающие оптоэлектронные приборы для спектральных диапазонов 1.3 и 1.55 мкм составляют более двух третей всех полупроводниковых лазеров, при этом их производство ежегодно увеличивается на 60%. В настоящее время подавляющая часть этих лазеров выполнена в плоскостной геометрии. В то же время вертикально излучающие лазеры (ВИЛ — VCSEL) весьма перспективны для использования в телекоммуникационных приложениях из-за их лучшего сопряжения с оптическими волокнами и более высокой температурной стабильности. Лучшие структуры ВИЛ, работающие на длине волны 1.3 мкм, изготавливаются на основе спекания активной области InGaAs/InP с распределенными брегговскими отражателями (РБО) AlGaAs [1,2]. Подобные устройства могут иметь весьма ограниченное применение вследствие сложности и высокой стоимости их производства. Помимо ВИЛ широкое применение могут найти и светодиоды с вертикальными резонаторами (СД ВР) [3], для которых характерны относительно простой процесс изготовления и отсутствие пороговых характеристик.

Все вышеперечисленное стимулирует попытки создания светоизлучающих приборов в этом спектральном диапазоне на подложках GaAs как в обычной геометрии [4–8], так и с вертикальными резонаторами [9–12]. В данной работе исследуются возможности создания ВИЛ и СД ВР диапазона 1.3 мкм на основе гетероструктур с квантовыми точками InAs/InGaAs.

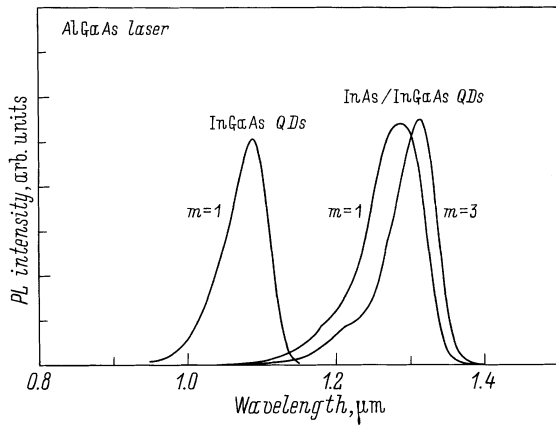
## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Рост и оптические свойства структур с квантовыми точками InAs/InGaAs

Все структуры, изучаемые в работе, были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs(001). Для тестовых структур один

или несколько слоев квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs осаждались на поверхность GaAs и ограничивались с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками AlAs/GaAs. Каждый слой КТ формировался путем осаждения 2.5–2.75 монослоев InAs, зарощаемых слоем  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  толщиной 5.5–7.5 нм [13]. Толщина GaAs, разделяющего слои с КТ, составляла 25 нм. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась либо  $\text{Ar}^+$ -лазером (100 Вт/см<sup>2</sup>, 515 нм), либо полупроводниковым AlGaAs-лазером (5 Вт/см<sup>2</sup>, 782 нм). Свет галогеновой лампы использовался для исследований оптического отражения (ОО). Германиевый фотодиод на выходе монохроматора применялся в схеме синхронного детектирования.

Основной проблемой при использовании КТ в качестве активной области является их невысокая поверхностная плотность (особенно для 1.3 мкм спектрального диапазона) [4]. В то же время стэкирование (stacking, т.е. вертикальное складирование) КТ может приводить к драматическому увеличению числа центров безызлучательной рекомбинации [14]. Однако оптимизация роста КТ InAs/InGaAs путем тщательного подбора скоростей роста, толщин и состава слоев, а также использование довольно толстых (20–25 нм) спейсеров GaAs, выращенных при более высоких температурах [15], позволяют получить массивы КТ с относительно высокой плотностью  $(3–4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  во всех слоях с КТ. На рис. 1 представлены спектры ФЛ тестовых образцов с различным составом индия в КТ и различным числом слоев с КТ ( $m$ ). Длина волны излучения может контролироваться изменяться в пределах от 1.15 до 1.3 мкм без ухудшения излучательных свойств. В условиях низкого уровня возбуждения интенсивности ФЛ для одиночного слоя КТ и для 3 слоев КТ равны. При увеличении уровня оптического возбуждения наблюдается линейный характер зависимостей интегральной интенсивности ФЛ от плотности возбуждения для структур с различным



**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции для тестовых структур, измеренные при комнатной температуре ( $m$  — число слоев с квантовыми точками).

числом слоев с КТ ( $m = 1, 3, 5$ ). Это свидетельствует о том, что излучательная рекомбинация является основным механизмом релаксации неравновесных носителей. Таким образом, при оптимизации условий МПЭ стакирование слоев с КТ не приводит к деградации оптических свойств структур.

## 2.2. Структуры с вертикальными микрорезонаторами

Предварительно оптимизированные КТ InAs/InGaAs были использованы в резонансных структурах в качестве активной области. Как структуры для оптических исследований, так и структуры СД ВР содержали нижние 33-периодные РБО AlAs/GaAs. В оптических структурах 3 слоя с КТ InAs/InGaAs были расположены в центре нелегированного GaAs-резонатора с толщиной, равной длине волны света в кристалле ( $1\lambda$ -резонатор). Для структур СД ВР использовался  $2\lambda$ -резонатор с той же активной областью, с обеих сторон от которой располагались короткопериодные сверхрешетки (СР)  $Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs$  с эффективной толщиной  $\lambda/4$ , играющие роль эмиттеров. Две последние пары РБО AlAs/GaAs и нижняя часть резонатора (включая СР) были легированы кремнием, а верхняя часть резонатора (включая СР) — бериллием. Структура СД ВР была завершена 2 парами РБО  $Al_{0.25}Ga_{0.75}As:Be/GaAs:Be$ , необходимыми для формирования  $p$ -контакта и лучшего растекания тока в приборе. Верхние зеркала формировались путем осаждения РБО  $ZrO_2/SiO_2$  как для оптических, так и для структур СД ВР.

Для ВИЛ роль зеркал играли РБО AlO/GaAs (5 и 7.5 периодов для верхнего и нижнего РБО соответственно), полученные селективным окислением эпитаксиальных слоев AlAs в парах воды. Симметричный  $5\lambda$ -резонатор состоял из  $(7\lambda/4)$ -слоев GaAs:(Si или Be), примыкающих к РБО; апертурных  $(\lambda/4)$ -слоев AlAs:(Si или Be), а также центрального

нелегированного слоя GaAs, в центре которого были помещены 3 слоя с КТ.

И для СД ВР, и для ВИЛ были использованы  $n$ - и  $p$ -контакты непосредственно к легированным слоям внутри резонатора. Ограничение носителей в СД ВР осуществлялось протонной имплантацией пассивных областей прибора [16], в то время как в ВИЛ были сформированы апертуры путем частичного окисления AlAs-слоев резонатора [17].

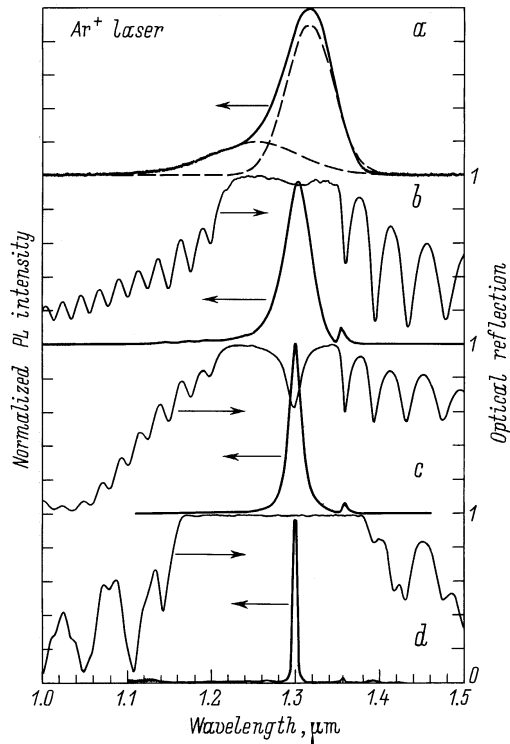
## 2.3. Методика калибровки структур с микрорезонаторами

Основной трудностью при выращивании структур с вертикальными микрорезонаторами методом МПЭ является то, что даже небольшая ошибка ( $\sim 1-2\%$ ) в толщинах слоев РБО и (или) самого резонатора может приводить к деградации характеристик прибора. В нашем случае ростовая камера не была оборудована для мониторинга толщин растущих слоев *in situ*. Поэтому необходимы были предварительные калибровки. Была разработана специальная калибровочная структура, состоящая из 6 пар РБО Al(Ga)As/GaAs и GaAs- $(\lambda/2)$ -резонатора. Спектры ОО измерялись как для полной структуры, так и после селективного травливания GaAs-резонатора и верхнего слоя Al(Ga)As. Сравнение и анализ полученных и смоделированных спектров ОО позволяют определить толщины слоев как GaAs, так и Al(Ga)As. Таким образом, только одна дополнительная структура необходима для калибровки скоростей роста GaAs и Al(Ga)As. Однако для более точной калибровки микрорезонаторов, содержащих несколько слоев с КТ, обычно требуется дополнительный эпитаксиальный процесс.

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Фотолюминесценция и оптическое отражение от структур с квантовыми точками в микрорезонаторах

Созданию оптоэлектронных приборов на основе КТ в микрорезонаторах предшествовали предварительные исследования оптических структур. На рис. 2, *a* представлен типичный спектр ФЛ, измеренный при комнатной температуре для тестовой структуры с КТ, в которой отсутствовали РБО (верхняя кривая). Анализ показывает, что спектр ФЛ представляет собой суперпозицию двух пиков, соответствующих основному (длинноволновый пик) и возбужденному (коротковолновый пик) состояниям КТ (численный анализ пиков представлен на рис. 2, *a* штриховыми линиями). Полуширина пика основного состояния вследствие неоднородного уширения составляет 55 нм (40 мэВ). Размещение КТ внутри микрорезонатора приводит к существенной модификации спектров ФЛ. В зависимости от добротности микрорезонатора полуширина спектров ФЛ уменьшается и составляет всего 4 нм (рис. 2, *d*) при использовании верхнего диэлектрического РБО, состоящего из 13 пар  $ZrO_2/SiO_2$ .



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции (ФЛ) (толстые сплошные линии) и оптического отражения (тонкие сплошные линии) для структур с различным числом пар  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  в верхнем распределенном брэгговском отражателе (РБО), измеренные при комнатной температуре. *a* — спутниковый образец как без верхнего, так и без нижнего РБО. Число пар в верхнем РБО: *b* — 0, *c* — 2, *d* — 13. Численный анализ пиков в спектре ФЛ показан штриховыми кривыми.

Несмотря на то что наблюдается заметное сужение линии ФЛ (от 55 до 4 нм), из расчетов следует, что в случае идеальных РБО, состоящих из 33 пар  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$  и 13 пар  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ , полуширина спектра ФЛ должна быть существенно уже (0.005 нм). Это говорит о том, что коэффициент отражения реальных зеркал не достигает расчетного уровня. При отсутствии верхнего РБО роль верхнего зеркала играет граница  $\text{GaAs}/\text{воздух}$ , которая обеспечивает коэффициент отражения  $\sim 30\%$ . В этом случае из-за высокоотражающего нижнего РБО  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$  получается сильно несимметричный резонатор, и провал в спектре ОО должен быть практически не виден. Однако в эксперименте наблюдается заметный провал (рис. 2, *b*), что можно объяснить недостаточно высоким коэффициентом отражения нижнего РБО  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$ . О том же говорит и тот факт, что при высокоотражающем верхнем РБО, состоящем из 13 пар  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ , провал в спектре ОО не наблюдается из-за асимметрии микрорезонатора (рис. 2, *d*).

По полуширине спектра ФЛ можно численно оценить коэффициенты отражения зеркал. Действительно, произведение коэффициентов отражения верхнего ( $R_t$ ) и

нижнего ( $R_b$ ) зеркал равно [18]

$$R_t R_b = \left[ 1 - \pi \frac{N_{\lambda/2}}{Q} \right]^2, \quad (1)$$

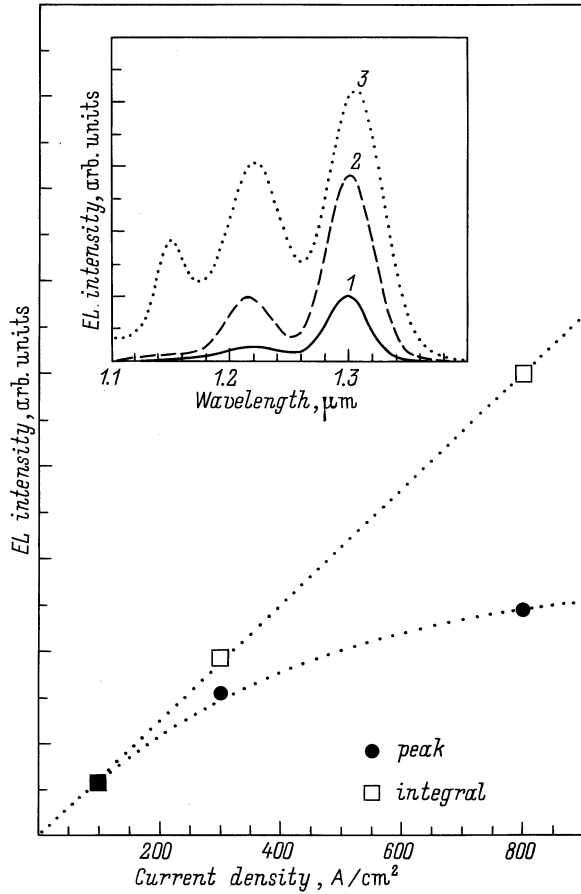
где  $N_{\lambda/2}$  — эффективная длина микрорезонатора, выраженная в числе длин полуволн, а  $Q$  — фактор качества микрорезонатора ( $Q = \lambda/\Delta\lambda$ ,  $\lambda$  — резонансная длина волны,  $\Delta\lambda$  — полуширина линии ФЛ или провала в спектре ОО). Так как электромагнитная волна проникает в РБО (см. далее, разд. 3.2), имеем  $N_{\lambda/2} = 6$ . Подставив это значение и  $Q = 430$  в (1), получаем  $R_t R_b = 0.91$ . Учитывая приведенные выше рассуждения и тот факт, что при увеличении числа пар верхнего РБО  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  более 5–6 полуширина линии ФЛ практически не изменяется, можно предположить, что определяющий вклад в пропускание вносит нижний РБО  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$ . Таким образом, на доступном нам оборудовании МПЭ из-за флуктуации толщины слоев  $\text{AlAs}$  и  $\text{GaAs}$  в полупроводниковом РБО и неточностей калибровок уверенно можно получать коэффициенты отражения до 91% от РБО  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$ .

### 3.2. Выбор конструкции приборов

Структуры с КТ, излучающими в диапазоне 1.3 мкм, характеризуются малым модовым усилением из-за насыщения усиления основного состояния КТ. Далее проводится рассмотрение различных типов микрорезонаторов с точки зрения возможности их использования в оптоэлектронных приборах на основе КТ  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  и, в частности, в ВИЛ.

На рис. 3 приведены зависимости интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) от плотности тока. Эти зависимости получены при комнатной температуре для обычного нерезонансного светодиода. Интенсивность ЭЛ основного состояния насыщается с увеличением плотности тока, хотя интегральная интенсивность ЭЛ растет линейно. На спектрах ЭЛ ясно видно не только основное состояние, но и два возбужденных. Отличие от спектров ФЛ, приведенных в предыдущем разделе, где наблюдается только одно возбужденное состояние, заключается в существенно большем уровне возбуждения КТ при плотности тока  $\sim 0.8 \text{ кА}/\text{см}^2$ , чем при возбуждении ФЛ аргоновым лазером.

Такой же эффект, т. е. насыщение интенсивности основного состояния, наблюдался нами и для полосковых лазеров с несколькими слоями КТ  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  в качестве активной области [19]. Как следует из проведенных исследований, материальное усиление ( $g_{\text{mat}}$ ) не превосходит  $1000 \text{ см}^{-1}$  для трех слоев КТ [20]. Для использования этих данных в случае вертикальных микрорезонаторов мы предположили, что материальное усиление КТ имеет примерно одинаковое значение для всех направлений. Это верно, если волновая функция экситона в КТ имеет форму, близкую к сферической. Тогда для возникновения



**Рис. 3.** Зависимости интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) от плотности тока для обычного светодиода на квантовых точках, измеренные при комнатной температуре. Величина интенсивности: черные кружки — в пике спектра ЭЛ, квадраты — интегральная. На вставке — спектры люминесценции, полученные при плотностях тока,  $\text{A}/\text{cm}^2$ : 1 — 100, 2 — 300, 3 — 800.

лазерной генерации необходимо выполнение следующего условия [18]:

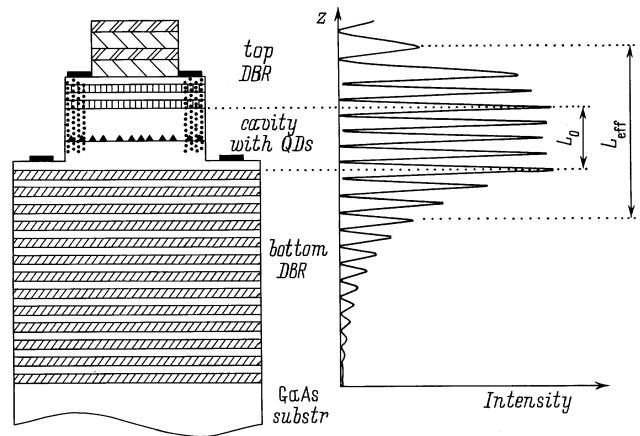
$$g_{\text{mat}} \Gamma_{xy} \xi \frac{L_{\text{act}}}{L_{\text{eff}}} \geq \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{ext}}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_{xy}$  — фактор перекрытия световой волны с активной областью в плоскости, перпендикулярной направлению роста ( $\Gamma_{xy} \approx 1$  для больших ( $> 5 \text{ мкм}$ ) апертур);  $\xi$  — фактор стоячей волны ( $\xi \approx 2$ );  $L_{\text{act}}$  — толщина активной области;  $L_{\text{eff}}$  — эффективная толщина микрорезонатора (может существенно отличаться от номинальной толщины микрорезонатора из-за проникновения электромагнитной волны в РБО — рис. 4 и 5);  $\alpha_{\text{int}}$  и  $\alpha_{\text{ext}}$  — внутренние потери и потери на выход излучения соответственно. Подстановка численных значений в левую часть соотношения (2) показывает, что модовое усиление в приборах с вертикальными микрорезонаторами не превышает  $4 \text{ см}^{-1}$ . Следовательно, потери на выход

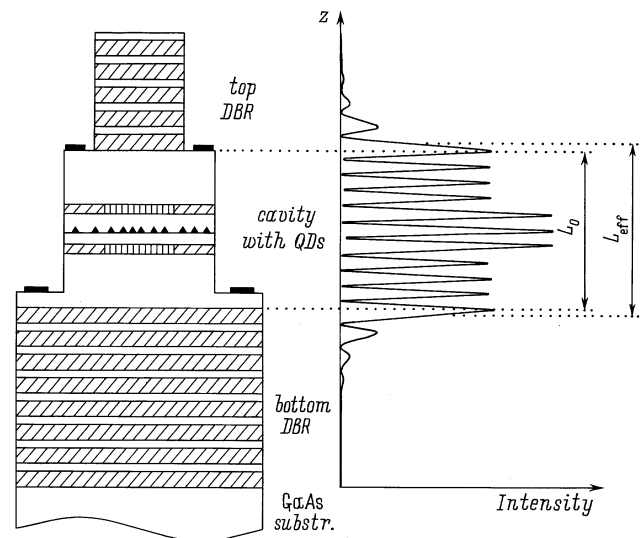
излучения, которые могут быть рассчитаны по формуле

$$\alpha_{\text{ext}} = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \ln \left( \frac{1}{\sqrt{R_t R_b}} \right), \quad (3)$$

также должны быть меньше этого значения. Расчет для структуры с 33-периодным нижним РБО  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$  и 13-периодным верхним РБО  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  показывает, что  $R_t R_b = 0.99995$ , а  $\alpha_{\text{ext}} = 0.12 \text{ см}^{-1}$ . Это значение значительно меньше, чем максимальное модовое усиление ( $4 \text{ см}^{-1}$ ), однако из предыдущего раздела мы знаем, что реальное значение  $R_t R_b$  составляет 0.91, что приводит к потерям на вывод излучения на уровне  $250 \text{ см}^{-1}$ . В этом случае лазерная генерация не может быть осуществлена. Чтобы преодолеть это затруднение, мы использовали РБО  $\text{AlO}/\text{GaAs}$ , полученные окислением эпитаксиальных слоев  $\text{AlAs}$ . Соединения  $\text{Al}_x\text{O}_y$  и  $\text{GaAs}$  имеют большую разницу в показателях преломления (1.7 и 3.45 для  $\text{Al}_x\text{O}_y$



**Рис. 4.** Схематическое изображение светодиода с вертикальным резонатором (СД ВР) и распределение интенсивности электромагнитного поля на резонансной длине волны.



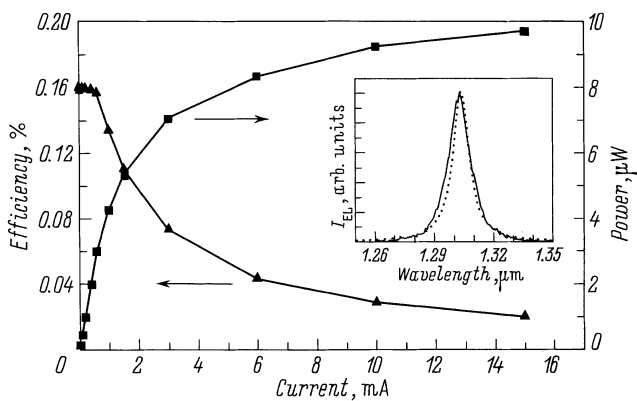
**Рис. 5.** Схематическое изображение вертикально излучающего лазера (ВИЛ) и распределение интенсивности электромагнитного поля на резонансной длине волны.

и GaAs соответственно, на длине волны 1.3 мкм), что позволяет использовать небольшое число периодов в РБО и снижает требования к контролю толщины эпитаксиальных слоев. Для структуры с 7.5-периодным нижним и 5-периодным верхним РБО AlO/GaAs получаются расчетные значения:  $R_r R_b = 0.999$ , а  $\alpha_{\text{ext}} = 2.5 \text{ см}^{-1}$ . Эти значения существенно хуже, чем расчетные значения для РБО AlAs/GaAs и  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ . Однако, как будет показано далее, они вполне достаточны для реализации лазерной генерации.

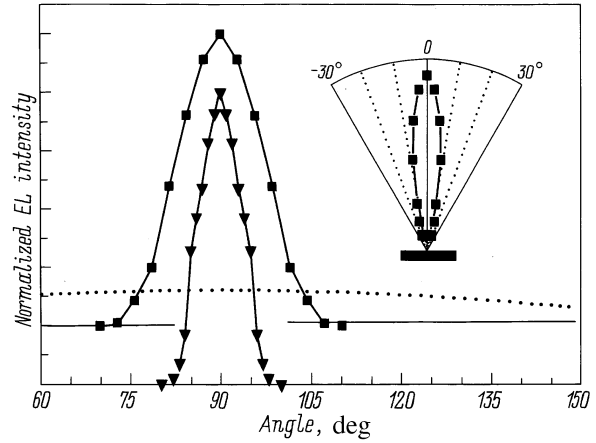
### 3.3. Светодиоды с вертикальными резонаторами

Так как для функционирования СД ВР не требуются высокодобротные резонаторы с низкими потерями на выход, нами был использован более простой приборный дизайн на основе полупроводникового и диэлектрического РБО в качестве верхнего и нижнего зеркал соответственно. На рис. 6 представлена ватт-амперная характеристика СД ВР со световым окном  $34 \times 37 \text{ мкм}$  и токовой апертурой  $40 \times 40 \text{ мкм}$ . Эта характеристика имеет линейный участок при низких значениях тока, а затем насыщается до уровня выходной мощности  $\sim 10 \text{ мкВт}$ . Это приводит к уменьшению квантовой эффективности прибора при больших плотностях тока (рис. 6), которая при малых плотностях тока составляет  $\sim 0.16\%$ . Полученное значение находится в хорошем соответствии с результатами, полученными для нерезонансных светодиодов с КТ, излучающими в диапазоне 1.3 мкм [21], что говорит об отсутствии улучшения светового вывода в нашей СД ВР структуре. Это, по всей видимости, объясняется неоптимальным сочетанием высокодобротного резонатора и широкого спектра излучения КТ [22].

Тем не менее исследованные СД ВР обладают другими свойствами, характерными для структур с микрорезонаторами, а именно узкой спектральной характеристикой и низкой расходимостью светового пучка. На вставке



**Рис. 6.** Ватт-амперная характеристика светодиода с вертикальным резонатором СД ВР (квадраты) и зависимость квантовой эффективности от тока (треугольники). На вставке — спектры электролюминесценции для СД ВР: экспериментальный (сплошная линия) и расчетный (пунктирная линия).

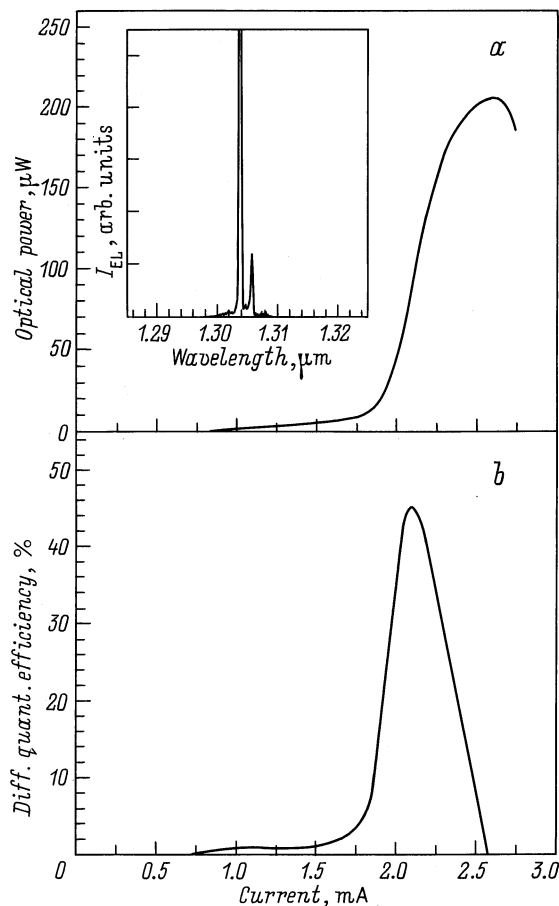


**Рис. 7.** Распределение дальнего поля для светодиода с вертикальным резонатором, интегрированное по длинам волн (квадраты) и на длине волны максимума (треугольники). Пунктирной линией показано распределение дальнего поля для обычного нерезонансного светодиода. На вставке — те же данные, но в полярных координатах.

к рис. 6 представлен спектр ЭЛ для СД ВР, имеющий максимум на длине волны 1.303 мкм и ширину на полувысоте 13 нм, которая не изменяется с увеличением тока. Там же пунктирной линией представлен расчетный спектр, который практически совпадает с экспериментальным. Распределение дальнего поля, показанное на рис. 7 (квадраты) для интегрированной по длинам волн мощности, имеет полуширину  $17^\circ$ , что существенно уже распределения дальнего поля для обычного нерезонансного диода (пунктирная линия). Распределение дальнего поля на резонансной длине волны (рис. 7, треугольники) имеет более сложное строение, что связано с влиянием различных поперечных мод.

### 3.4. Лазерная генерация в вертикальном направлении при инжекционной накачке

Как было показано в разд. 3.2, использование всего нескольких пар РБО AlO/GaAs дает достаточно высокий коэффициент отражения и снижает оптические потери до величины  $2.5 \text{ см}^{-1}$ , что позволило нам реализовать лазерную генерацию в вертикальном направлении в структурах, выполненных с использованием технологии окисления слоев AlAs. На рис. 8, а представлена ватт-амперная характеристика вертикально излучающего лазера (ВИЛ). Порог лазерной генерации составляет 1.8 мА, что соответствует плотности тока  $2.8 \text{ кА/см}^2$  [23]. Спектр лазерной генерации, измеренный при превышении порогового тока на 5%, помимо основного пика на 1.304 мкм имеет дополнительный пик с длинноволновой стороны от основного (см. вставку на рис. 8, а). Возникновение этого дополнительного пика может быть объяснено латеральным ограничением световой волны в апертуре  $8 \times 8 \text{ мкм}$ . Несмотря на низкие внешние оптические потери в этой структуре ( $2\text{--}3 \text{ см}^{-1}$ ), дифференци-



**Рис. 8.** Ватт-амперная характеристика вертикально излучающего лазера (а) и зависимость дифференциальной квантовой эффективности от тока через лазер (b). На вставке — спектр лазерной генерации при токе, превышающем пороговый на 5%.

альная квантовая эффективность имеет достаточно высокие значения и достигает величины в 45% (рис. 8, b), что возможно в случае низких внутренних потерь. Действительно, полосковые лазеры с КТ InAs/InGaAs в качестве активной области, излучающими в диапазоне 1.3 мкм, характеризуются низкими значениями внутренних потерь ( $1-2 \text{ см}^{-1}$ ) [24]. Использование в ВИЛ апертуры более 5 мкм и невысоких уровней легирования ( $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) позволило добиться того, что дифракционные потери и потери на поглощении свободными носителями также малы. В этом случае внутренние потери сравнимы с потерями на вывод излучения, что объясняет столь высокую дифференциальную эффективность. Напротив, для КТ InGaAs, излучающих в диапазоне 1 мкм, внутренние потери больше; достижение высокоэффективной лазерной генерации затруднено и требует использования зеркал с меньшими коэффициентами отражения. Так, дифференциальную квантовую эффективность в 30% удалось получить в (1 мкм)-ВИЛ с 3 парами в верхнем РБО AlO/GaAs, а при использовании 5 пар эффективность падала до 4% [25].

Приборы с РБО AlO/GaAs, полученные окислением слоев AlAs, имеют тенденцию к отслаиванию с течением времени. Введение в эти слои во время эпитаксии небольшого количества Ga ( $\sim 2\%$ ) приводит к стабилизации РБО Al(Ga)O/GaAs. Использование в приборах РБО Al(Ga)O/GaAs позволило нам получить лазерную генерацию на длине волны 1.3 мкм в непрерывном режиме в течение длительного времени при температуре  $35^\circ\text{C}$  (на настоящий момент структуры простояли более 700 ч, и деградация порогового тока не наблюдалась). Максимальная выходная мощность составляла 0.65 мВт, а максимальные дифференциальная квантовая эффективность и коэффициент полезного действия: 39–40% и 10–15% соответственно [26].

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе теоретически проанализированы и экспериментально исследованы различные типы структур светодиода с вертикальным резонатором (СД ВР) и вертикально излучающего лазера (ВИЛ) диапазона 1.3 мкм на основе гетероструктур с квантовыми точками InAs/InGaAs, выращенных на подложках GaAs. Показано, что при использовании полупроводниковых распределенных брэгговских отражателей AlAs/GaAs требуется прецизионный контроль толщины слоев, так как даже небольшая ошибка ( $\sim 1-2\%$ ) приводит к существенному ухудшению характеристик прибора. Получены СД ВР, обладающие узкой спектральной характеристикой ( $\sim 13 \text{ нм}$ ) и низкой расходимостью светового пучка ( $< 20^\circ$ ). Использование оксидных зеркал AlO/GaAs позволило создать инжекционные ВИЛ диапазона 1.3 мкм с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, демонстрирующие низкие пороговые токи ( $< 2 \text{ мА}$ ) и высокую внешнюю дифференциальную эффективность ( $> 40\%$ ).

Работа выполнена при поддержке программы Министерства науки и технологий РФ "Физика твердотельных наноструктур", Российского фонда фундаментальных исследований, программы NanOp и INTAS.

#### Список литературы

- [1] Y. Qian, Z.H. Zhu, Y.H. Lo. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 25 (1997).
- [2] V. Jayaraman, J.C. Geske, M.H. MacDougall, F.H. Peters, T.D. Lowes, T.T. Char. In: *Proceedings 11th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society* (Orlando, FL, USA, 1998) p. 210.
- [3] N.E.J. Hunt, E.F. Schubert, R.A. Logan, G.J. Zydzik. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2287 (1992).
- [4] D.L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O.B. Shchekin, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2564 (1998).
- [5] Yu.M. Shernyakov, D.A. Bedarev, E.Yu. Kondrat'eva, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, N.A. Malcev, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **35**, 898 (1999).

- [6] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani, M.C. Larson, K. Uomi. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 487 (1998).
- [7] A.Yu. Egorov, D. Bernklau, D. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, H. Riechert. *Electron. Lett.*, **35**, 1643 (1999).
- [8] K. Nishi, T. Anan, S. Sugou. In: *Proceedings IEEE/LEOS Summer Topical Meeting, Workshop on Nanostructures and Quantum Dots* (San Diego, CA, USA, July 26–27, 1999) p. 39.
- [9] T. Anan, K. Nishi, S. Sugou, M. Yamada, K. Tokutome, A. Gomyo. *Electron. Lett.*, **34**, 2127 (1998).
- [10] M.C. Larson, M. Kondow, T. Kitatani, K. Nakahara, K. Tamura, H. Inoue, K. Uomi. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 188 (1998).
- [11] G. Steinle, A.Yu. Egorov, H. Riechert. In: *Proceedings Summer School and European Optical Society Topical Meeting on Semiconductor Microcavity Photonics* (Ascona, Switzerland, Oct. 21–25, 2000).
- [12] K.D. Choquette, J.F. Klem, A.J. Fisher, O. Blum, A.A. Allerman, I.J. Fritz, S.R. Kurtz, W.G. Breiland, R. Sieg, K.M. Geib, J.W. Scott, R.L. Naone. *Electron. Lett.*, **36**, 1388 (2000).
- [13] V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, A.V. Lunev, B.V. Volovik, I.L. Krestnikov, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2815 (1999).
- [14] K. Mukai, Y. Nakata, K. Otsubo, M. Sugawara, N. Yokoyama, H. Ishikawa. *IEEE J. Quant. Electron.*, **36**, 472 (2000).
- [15] Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, В.М. Устинов, Д.А. Бедарев, Б.В. Воловик, И.Л. Крестников, И.Н. Каяндрер, В.А. Однблюдов, А.А. Суворова, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Н.Н. Леденцов, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. *ФТП*, **34**, 612 (2000).
- [16] N.A. Maleev, I.L. Krestnikov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.V. Sakharov, D.A. Bedarev, W. Passenberg, E. Pawlowski, A.F. Tsatsulnikov, H. Kunzel, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. In: *Proceedings Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots* (Munich, Germany, July 31–Aug. 3, 2000) to be published in *Phys. St. Sol.*
- [17] N.N. Ledentsov, D. Bimberg, V.M. Ustinov, M.V. Maximov, Zh.I. Alferov, V.P. Kalosha, J.A. Lott. *Semicond. Sci. Techn.*, **14**, 99 (1999).
- [18] *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, ed. by C. Wilmsen, H. Temkin and L.A. Coldren (Cambridge University Press, 1999).
- [19] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsulnikov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.M. Shernyakov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1926 (1999).
- [20] M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, D.A. Bedarev, E.Yu. Kondrat'eva, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, A.F. Tsatsulnikov, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **35**, 2038 (1999).
- [21] D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 520 (1998).
- [22] H. Benisty, H. De Neve, C. Weisbuch. *IEEE J. Quant. Electron.*, **34**, 1612 (1998).
- [23] J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **36**, 1384 (2000).
- [24] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, Yu.M. Shernyakov, S.S. Mikhlin, N.A. Maleev, E.Yu. Kondrat'eva, D.A. Livshits, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 1345 (1999).
- [25] J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **33**, 1150 (1997).
- [26] J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. Доклад на LEOS 2000. In: *Abstract Book LEOS 2000* (Rio Grande, Puerto Rico, Nov. 13–16, 2000) p. 304.

Редактор Т.А. Полянская

### Vertical micro-cavities on 1.3 $\mu\text{m}$ with InAs/InGaAs quantum dots and the devices on their base

A.V. Sakharov, I.L. Krestnikov, N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, A.F. Tsatsulnikov, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg\*, J.A. Lott<sup>+</sup>, Zh.I. Alferov

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

\* Institut für Festkörperphysik,  
Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany

<sup>+</sup> Air Force Institute of Technology,  
Department of Electrical and Computer Engineering,  
Wright–Patterson AFB, Ohio, USA 45433