

# InGaAs/GaAs/AlGaAs-лазеры с широким контактом, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии

© П.В. Булаев\*, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк\*, Д.Б. Никитин\*, Д.Н. Николаев, А.А. Падалица\*, Н.А. Пихтин, А.Д. Бондарев, И.Д. Залевский\*, И.С. Тарасов

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

\* Сигм Плюс,  
117342 Москва, Россия

(Получена 4 марта 2002 г. Принята к печати 11 марта 2002 г.)

Разработана технология МОС-гидридной эпитаксии лазерных гетероструктур в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs и оптимизированы геометрия и профиль легирования структуры для снижения внутренних оптических потерь. Изготовлены меза-полосковые лазерные диоды с пороговыми плотностями тока  $J_{th} = 150\text{--}200 \text{ А/см}^2$ , внутренними оптическими потерями  $\alpha_i = 1.6\text{--}1.9 \text{ см}^{-1}$  и внутренним квантовым выходом  $\eta_i = 85\text{--}95\%$ . Получена в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения 6.5 Вт из лазерного диода с апертурой 100 мкм на длине волны излучения 0.98 мкм, ограниченная катастрофической оптической деградацией зеркал. Расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной  $p\text{--}n$ -переходу, составляла  $\theta_{\perp} = 25\text{--}30^\circ$ . Показано, что использование широкозонных волноводных слоев, увеличивающих глубину потенциальной ямы активной области для электронов, снижает температурную чувствительность лазерных гетероструктур в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs в температурном диапазоне  $0\text{--}70^\circ\text{С}$ .

## 1. Введение

В последних работах [1–3] мы подробно исследовали лазерные гетероструктуры с раздельным ограничением в системах твердых растворов InGaAs/GaAs/InGaP и InGaAs/GaAs/AlGaAs. В качестве волновода в этих структурах использовались эпитаксиальные слои арсенида галлия. Конструкция лазерной гетероструктуры с „сильным“ волноводом позволяет снизить внутренние оптические потери в эмиттерах без значительного снижения их легирования. В результате в лазерных диодах на основе изготовленных гетероструктур были достигнуты рекордные мощности излучения в непрерывном режиме генерации [1,2]. Однако при всех достоинствах конструкция лазерной гетероструктуры с волноводом из арсенида галлия имеет ряд существенных недостатков. К ним относятся большая расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной  $n\text{--}p$ -переходу, ( $\theta_{\perp}$ ) и высокая температурная чувствительность пороговой плотности тока (малая характеристическая температура  $T_0$ ) [3]. Перечисленные недостатки не свойственны лазерам с расширенным широкозонным волноводом на основе гетероструктур в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs. Исследованию свойств лазерных диодов с широким меза-полосковым контактом на базе лазерных гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений), посвящена настоящая работа.

## 2. Экспериментальная установка и образцы лазерных гетероструктур

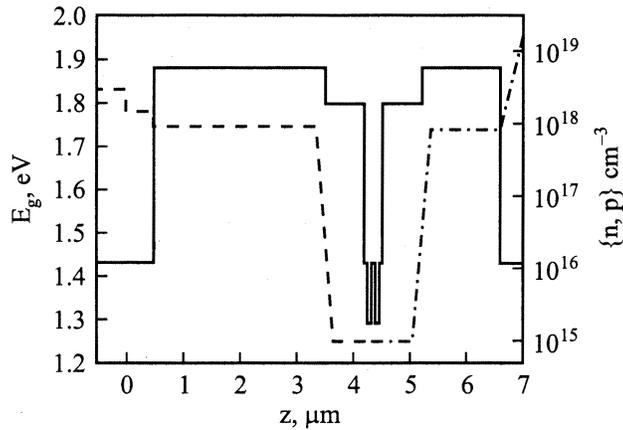
Лазерные гетероструктуры InGaAs/GaAs/AlGaAs выращивали методом МОС-гидридной эпитаксии на установке СИГМОС-130 с горизонтальным прямоугольным

кварцевым реактором. Вращение подложкодержателя, необходимое для обеспечения повышенной однородности структур, осуществлялось с помощью потока газа — носителя. Температура роста структур составляла  $770^\circ\text{С}$ , а типичное рабочее давление в камере реактора — 60 мм рт.ст.

В качестве источников элементов III группы использовались триэтилгаллий, триметилалюминий и триметилиндий. Источником элементов пятой группы был 100%-й арсин. Смесь силана с водородом (1:20) использовалась в качестве лигатуры для получения  $n$ -типа проводимости, а диэтилцинк — в качестве лигатуры для получения  $p$ -типа. Арсин перед подачей в газовую систему проходил двухступенчатую очистку продувкой через цеолит и суперочиститель „СигмаХИМ-1.0“. Это позволило снизить содержание кислорода и воды в арсине до значений не более 0.1 ppm. В качестве газа-носителя использовался водород, очищенный диффузией через нагретый до  $450^\circ\text{С}$  палладиевый фильтр до точки росы не выше  $-110^\circ\text{С}$ .

Выращивание производилось на подложках GaAs марки АГНК-2С, точно ориентированных в плоскости (100). Подложки были готовы к эпитаксии (epi-ready), поэтому предварительная обработка подложек перед процессом роста не проводилась.

Для исследований изготавливались анизотипные гетероструктуры раздельного ограничения. В качестве волноводных слоев в структуре были использованы эпитаксиальные слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 0.35–0.75 мкм с составом твердого раствора, соответствующим  $x = 20\text{--}30\%$ . Между волноводными слоями и слоями активной области выращивались промежуточные слои из GaAs толщиной 70 Å. Активная область лазерной гетероструктуры состояла из двух напряженных квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 50–80 Å с  $x = 15\text{--}20\%$ .



**Рис. 1.** Схематическая зонная диаграмма гетероструктуры раздельного ограничения InGaAs/GaAs/AlGaAs (сплошная линия) и расчетные профили легирования для донорной примеси Si (штриховая линия) и акцепторной примеси Zn (штрихпунктирная).  $z$  — координата в направлении роста гетероструктуры.

Энергетическая зонная диаграмма анизотипных гетероструктур раздельного ограничения приведена на рис. 1. В качестве акцепторной легирующей примеси использовался цинк, а в качестве донорной — кремний. Расчетный уровень легирования широкозонных эмиттеров и волноводных слоев показан на диаграмме.

Профиль легирования, толщины и составы слоев определялись при помощи профилометра Polaron 4200 и сканирующего электронного микроскопа JEOL T220A.

### 3. Экспериментальные образцы лазерных диодов

Из гетероструктур раздельного ограничения InGaAs/GaAs/AlGaAs изготавливались по стандартной технологии лазерные диоды с длиной волны излучения 0.98 мкм и шириной полоска  $w = 100$  мкм [1–3]. Диоды монтировались полосковым контактом вниз на медный теплоотвод. На торцы резонатора Фабри–Перо наносились отражающие и просветляющие диэлектрические покрытия SiO<sub>2</sub>/Si [1–3]. Исследовались ватт-амперные и вольт-амперные характеристики лазерных диодов в диапазоне температур теплоотвода  $T = 0–70^\circ\text{C}$ . В таблице приведены характерные параметры исследуемых лазерных диодов, изготовленных из структур с различной толщиной волновода  $D_w$ , и для сравнения из структуры с волноводом из GaAs [3].

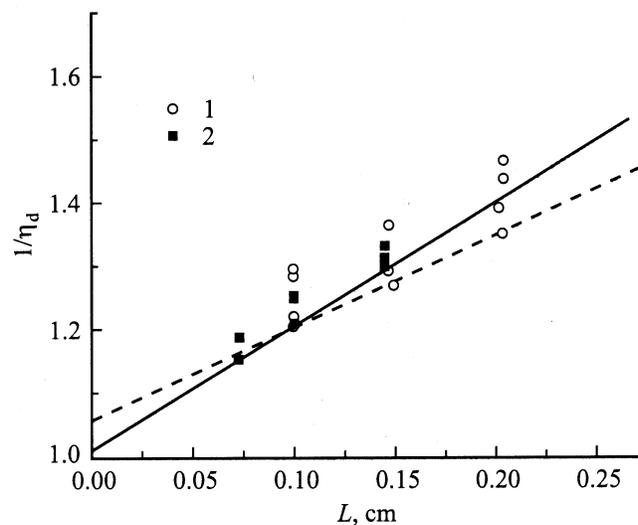
### 4. Экспериментальные результаты

Пороговая плотность тока в 4-сколотых образцах ( $1/L \rightarrow 0$ ,  $L$  — длина резонатора) во всех структурах находится на уровне 70–80 А/см<sup>2</sup> на одну квантовую яму, что косвенно через равенство пороговой концентрации неравновесных носителей подтверждает высокое

качество лазерных гетероструктур. Дифференциальная квантовая эффективность  $\eta_d$  на начальном участке ватт-амперной характеристики в лазерах с длиной резонатора  $L = 1.5–2$  мм составляет величину 80–90%. На рис. 2 приведены зависимости обратной величины дифференциальной квантовой эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора  $L$  для напаянных лазеров с просветляющими и высокоотражающими покрытиями SiO<sub>2</sub>/Si на гранях резонатора Фабри–Перо. Аппроксимация этих зависимостей прямыми, проведенными по минимальным значениям для каждой из длин резонатора, позволяет определить как внутренние оптические потери  $\alpha_i$ , так и внутренний квантовый выход стимулированного излучения (см. таблицу). Внутренний квантовый выход в лазерных диодах с широкозонным волноводом приближается к 100% и значительно превышает эту величину в лазерных диодах с GaAs-волноводом.

Применение широкозонного AlGaAs-волновода толщиной  $D_w = 0.75$  мкм приводит к некоторому возрастанию внутренних оптических потерь в структуре S-1435. Это происходит из-за снижения фактора оптического ограничения в широкозонном волноводом. Однако увеличение толщины волновода до 1.5 мкм в структуре S-1453 компенсирует это изменение, и внутренние потери остаются на уровне  $\alpha_i = 1.6 \text{ см}^{-1}$ , т. е. аналогичны потерям в структурах с GaAs-волноводом S-1450 (данная работа) и X-2578 [3].

Расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной эпитаксиальным слоям, определяется эффективным размером области свечения. Размер области свечения определяется стационарной конфигурацией электромагнитного поля, которая формируется за счет скачка эффективного показателя преломления на границах волноводных и эмиттерных слоев. В случае большого скачка показателя преломления образуется „сильный“



**Рис. 2.** Зависимости величины обратной дифференциальной квантовой эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора  $L$  лазерных диодов, изготовленных из структур S-1435 (1, сплошная линия) и S-1453 (2, штриховая линия).

## Параметры лазерных диодов

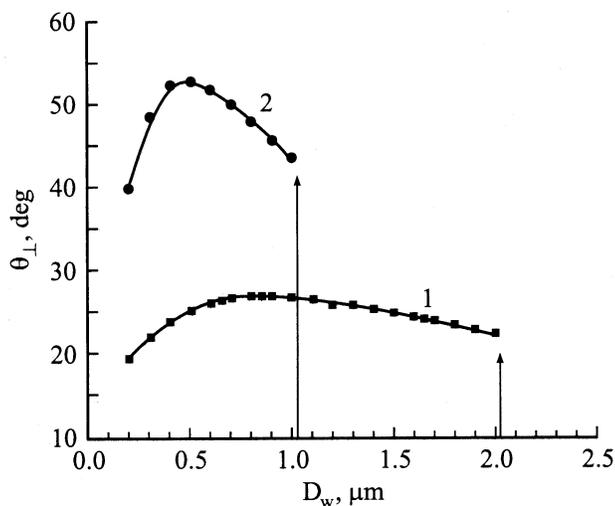
Структура	Внутренние оптические потери $\alpha_i$ , $\text{см}^{-1}$	Максимальная мощность излучения, Вт	Пороговая плотность тока $J_{th}$ , $\text{А/см}^2$ ( $L = 1.5\text{--}2.0$ мм)	Дифференциальная квантовая эффективность $\eta_d$ , % ( $L = 1.5\text{--}2.0$ мм)	Внутренний квантовый выход $\eta_i$ , %
S-1435 ( $D_w = 0.75$ мкм)	1.9	5.8	230	80–83	97
S-1453 ( $D_w = 1.5$ мкм)	1.6	6.6	250	80–82	94
X-2578 [3] и S-1450 ( $D_w = 0.6$ мкм, GaAs)	1.4–1.7	5.2	120	56	60–65

волновод и размер области свечения уменьшается, а расходимость излучения увеличивается. При одинаковых толщинах использование широкозонного волновода снижает его „силу“ и одновременно расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной эпитаксиальным слоям. В результате расходимость излучения в структурах S-1435 и S-1453 составляет величину  $25\text{--}30^\circ$ , а в структуре с GaAs-волноводом, обладающим самым „сильным“ волноводом, составляет  $45\text{--}50^\circ$ . В то же время условие отсечки или возможность существования любой не фундаментальной моды определяется „силой“ волновода (толщиной и скачком показателя преломления). Как следствие, для исключения возможности генерации второй моды суммарная толщина волноводных слоев в структуре с узкозонным GaAs-волноводом не должна превышать  $1.0$  мкм, в то время как в лазерных диодах с широкозонным волноводом эта величина не должна превышать  $2$  мкм (рис. 3). Следует отметить, что в этих условиях уже могла бы существовать первая мода в обоих типах гетероструктур, однако из-за ничтожно малого фактора оптического ограничения первой моды

для активной области пороговые условия генерации не выполняются и наблюдается генерация только фундаментальной моды.

Пониженная расходимость излучения в гетероструктурах с расширенным широкозонным волноводом (S-1435 и S-1453) позволяет увеличить эффективность ввода излучения в волокно, что очень важно при построении оптических систем. Например, коэффициент ввода в волокно диаметром  $60$  мкм (NA-0.22) для лазерных диодов с „сильным“ волноводом ( $\theta_\perp = 45\text{--}55^\circ$ ) не превышает  $60\text{--}65\%$ , тогда как упомянутые диоды ( $\theta_\perp = 25\text{--}30^\circ$ ) позволяют достигнуть значений  $85\%$ .

В предыдущих наших исследованиях [3] было показано, что применение в качестве волноводных слоев GaAs имеет преимущества технологического плана, позволяющие избежать сложности подбора режимов переключения газовых потоков в процессе эпитаксии. Однако это ограничивает глубину потенциальной квантовой ямы для электронов и для дырок. Даже использование в качестве активной области эпитаксиального слоя напряженного твердого раствора InGaAs с длиной волны излучения  $1.03$  мкм не сильно увеличивает это значение ( $\sim 75$  мэВ). Следствием этого является сильная температурная чувствительность пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности [3]. Применение широкозонного волновода в лазерных структурах существенно изменяет ситуацию. Температурная чувствительность пороговой плотности тока традиционно характеризуется параметром  $T_0$  в эмпирической зависимости порогового тока  $J_{th}(T) \propto \exp(T/T_0)$ . На рис. 4 приведена зависимость характеристической температуры  $T_0$  от длины лазерных диодов для серии лазерных гетероструктур S-1435, S-1450 и S-1453. Температурная чувствительность пороговой плотности тока возрастает с уменьшением длины резонатора лазерного диода во всех типах лазерных структур и значительно снижается в лазерных диодах на основе гетероструктур с широкозонным волноводом. Это связано с увеличением глубины квантовых ям активной области, за счет которого при увеличении температуры даже в коротких лазерных диодах подавляются дополнительные механизмы возрастания порогового тока, определяемые выбросом электронов из активной области в волноводные слои.



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости расходимости излучения от толщины волновода  $D_w$  для лазерных диодов с широкозонным AlGaAs-волноводом S-1435 (1) и GaAs-волноводом S-1450, X-2578 из [3] (2). Стрелки указывают на возникновение мод 2-го порядка.

Температурные зависимости пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности являются чрезвычайно важными параметрами при разработке мощных полупроводниковых лазеров в связи с тем, что активная область лазерного диода разогревается на несколько десятков градусов при пропускании непрерывного рабочего тока [4]. Поэтому борьба за снижение температурной чувствительности лазерных гетероструктур для мощных полупроводниковых лазеров является актуальной задачей, которую можно решать путем увеличения глубины потенциальной ямы для свободных носителей заряда.

На рис. 5 приведены зависимости выходной мощности генерации в непрерывном режиме и КПД от тока накачки лазерных диодов. Все лазерные диоды деградировали без признаков перегрева активной области и насыщения ватт-амперной характеристики. Во всех лазерных диодах наблюдался порог катастрофической деградации зеркал. Характерная фотография резонатора Фабри–Перо де-

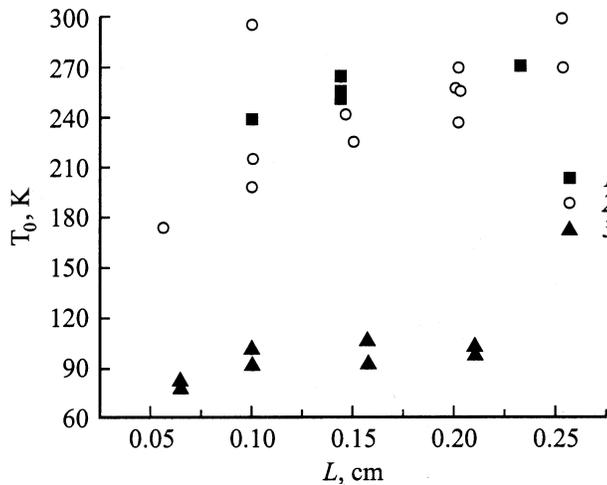


Рис. 4. Зависимость характеристической температуры  $T_0$  от длины резонатора  $L$  в лазерных диодах с широкозонными AlGaAs-волноводами S-1435 (1), S-1453 (2) и с GaAs-волноводом S-1450, X-2578 из [3] (3).

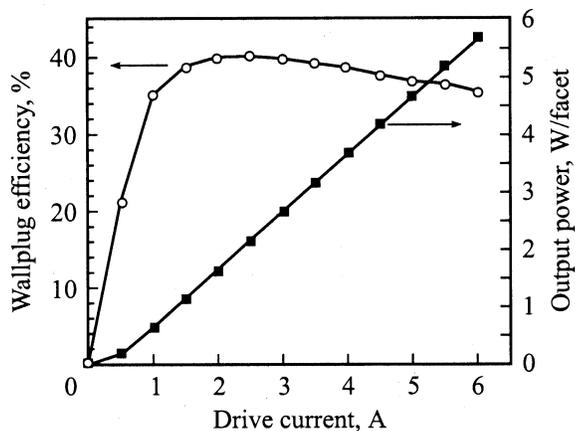


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика и зависимость КПД от тока накачки лазерного диода S-1435.

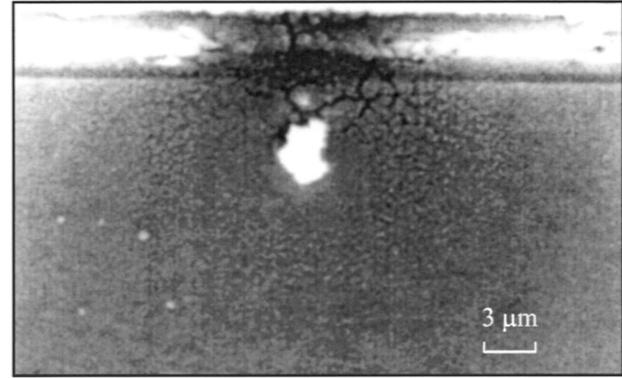


Рис. 6. Фотография торца лазерного диода S-1435 с просветляющим покрытием  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после деградации.

градировавшего лазерного диода приведена на рис. 6. Среднее значение порога катастрофической деградации зеркал составило  $11 \text{ МВт}/\text{см}^2$ , что значительно ниже значений, известных в настоящее время [1,2,5,6]. По нашему мнению, это связано с перегревом зеркал  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  [7] лазерных диодов, нанесенных на алюминийсодержащие слои в лазерной гетероструктуре.

## 5. Заключение

Разработана технология МОС-гидридной эпитаксии лазерных гетероструктур в системе твердых растворов GaAs/InGaAs/AlGaAs.

Изготовлены меза-полосковые лазерные диоды и исследованы ватт-амперные и вольт-амперные характеристики в диапазоне температур  $10\text{--}80^\circ\text{C}$ . Достигнуты пороговые плотности тока  $J_{\text{th}} \approx 150 \text{ А}/\text{см}^2$ , внутренние оптические потери составляют  $\alpha_i = 1.6\text{--}1.9 \text{ см}^{-1}$  и внутренний квантовый выход  $\eta_i = 85\text{--}95\%$ .

Получена в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения  $6.5 \text{ Вт}$  лазерного диода с апертурой  $100 \text{ мкм}$  на длине волны излучения  $0.98 \text{ мкм}$ , ограниченная порогом катастрофической оптической деградации зеркал. Расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной  $p\text{--}n$ -переходу, составляет  $\theta_{\perp} = 25\text{--}30^\circ$ .

Показано, что использование широкозонных волноводных слоев, увеличивающих глубину потенциальной ямы активной области для электронов, снижает температурную чувствительность лазерных диодов на основе гетероструктур GaAs/InGaAs/AlGaAs.

В заключение авторы выражают благодарность Т.Н. Дрокиной, А.Ю. Лешко и Т.А. Налет за помощь в изготовлении и подготовке образцов лазерных диодов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 01-02-17851) и программой „Физика твердотельных наноструктур“ (гранты № 99-2038 и № 99-2037).

## Список литературы

- [1] D.A. Livshits, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, N.N. Ledentsov, T.A. Nalyot, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. *Electron. Lett.*, **36**, 1848 (2000).
- [2] Д.А. Лившиц, А.Ю. Егоров, И.В. Кочнев, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов. *ФТП*, **35** (3), 380 (2001).
- [3] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипенченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов. *ФТП*, **35** (11), 1380 (2001).
- [4] Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, Г.А. Скрынников, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **34** (7), 886 (2000).
- [5] A. Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, J.C. Connolly. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2402 (1993).
- [6] X. He, S. Srinivasan, S. Wilson, C. Mitchell, R. Patel. *Electron. Lett.*, **34**, 2126 (1998).
- [7] Ж.И. Алфёров, Н.И. Кацавец, В.Д. Петриков, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин. *ФТП*, **30** (3), 474 (1996).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## MOCVD-grown InGaAs/GaAs/AlGaAs broad area laser diodes

*P.V. Bulaev\*, V.A. Kapitonov, A.V. Lyutetskiy, A.A. Marmalyuk\*, D.B. Nikitin\*, D.N. Nikolaev, A.A. Padalitsa\*, N.A. Pikhitin, A.D. Bondarev, I.D. Zalevskiy\*, I.S. Tarasov*

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

\* Sigm Plus,  
117342 Moscow, Russia

**Abstract** A metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD) technology has been developed for growth of InGaAs/GaAs/AlGaAs laser heterostructures. Optimum size and doping profile of structures have been suggested for the sake of reduction of internal optical losses. Mesastructure laser diodes with threshold current densities  $J_{th} = 150\text{--}200\text{ A/cm}^2$ , internal optical loss  $\alpha_i = 1.6\text{--}1.9\text{ cm}^{-1}$  and internal quantum efficiency  $\eta_i = 85\text{--}95\%$  have been fabricated. 6.5 W continuous wave optical output power has been achieved for a  $100\text{ }\mu\text{m}$  aperture mesastructure laser diode emitting at  $1.03\text{ }\mu\text{m}$  wavelength. The power has been limited by the catastrophic optical mirror damage. The beam divergence in the plane perpendicular to the  $p\text{--}n$ -junction  $\theta_{\perp} = 25\text{--}30^{\circ}$  has been obtained. It has been shown, that the use of waveguide layers with wide bandgap, which increase the conduction band offset, decreases the temperature sensitivity of InGaAs/GaAs/AlGaAs laser heterostructures within  $0\text{--}70^{\circ}\text{C}$  temperature range.