

# Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм на основе различных типов асимметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом

© В.В. Безотосный\*, В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.Н. Крохин\*, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова<sup>¶</sup>, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Ю.М. Попов\*, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов

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

\* Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
117924 Москва, Россия

(Получена 26 июня 2007 г. Принята к печати 4 июля 2007 г.)

Проведено сравнение параметров мощных многомодовых лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм, полученных на основе асимметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом в системах твердых растворов AlGaAs/GaAs и (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs. В лазерах на основе системы AlGaAs/GaAs максимальная оптическая мощность была ограничена катастрофической оптической деградацией зеркал SiO<sub>2</sub>/Si и составила 4.7 Вт. В лазерах на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs максимальная оптическая мощность была ограничена термическим насыщением и составила 7 Вт. Полученные результаты показали, что с точки зрения увеличения максимальной оптической мощности и срока службы лазеров более надежной является система (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs.

PACS: 42.55.Px, 78.55.Cr, 78.67.De

## 1. Введение

Полупроводниковые лазеры, излучающие на длине волны 808 нм, были разработаны и реализованы в системах AlGaAs/GaAs и GaInAsP/GaAs около двух десятилетий тому назад. Однако интерес к ним не ослабевает, поскольку они широко используются в системах для накачки твердотельных лазеров и волоконных усилителей. Динамичное развитие электронной промышленности требует постоянного совершенствования лазерных диодов — увеличения их оптической мощности, яркости, эффективности, срока службы.

Для улучшения характеристик лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм используются разные подходы [1–6]. В частности, в одной из наших последних работ [6] было показано, что использование асимметричной гетероструктуры со сверхшироким волноводом в традиционной системе твердых растворов AlGaAs/GaAs позволило существенно снизить внутренние оптические потери и увеличить максимальную оптическую мощность. Кроме того, расширение волновода влечет за собой снижение плотности потока энергии на диэлектрическом выходном зеркале SiO<sub>2</sub>, что также позволяет повысить максимальную оптическую мощность лазеров на гетероструктурах, содержащих алюминий. Тем не менее основной причиной, ограничивающей максимальную оптическую мощность таких лазеров, по-прежнему остается оптическая катастрофическая деградация зеркал. В данном аспекте лазерные гетероструктуры, не содержащие алюминий в активной области и волноводных слоях, могут оказаться более выигрышными по сравнению с гетероструктурой в системе AlGaAs/GaAs.

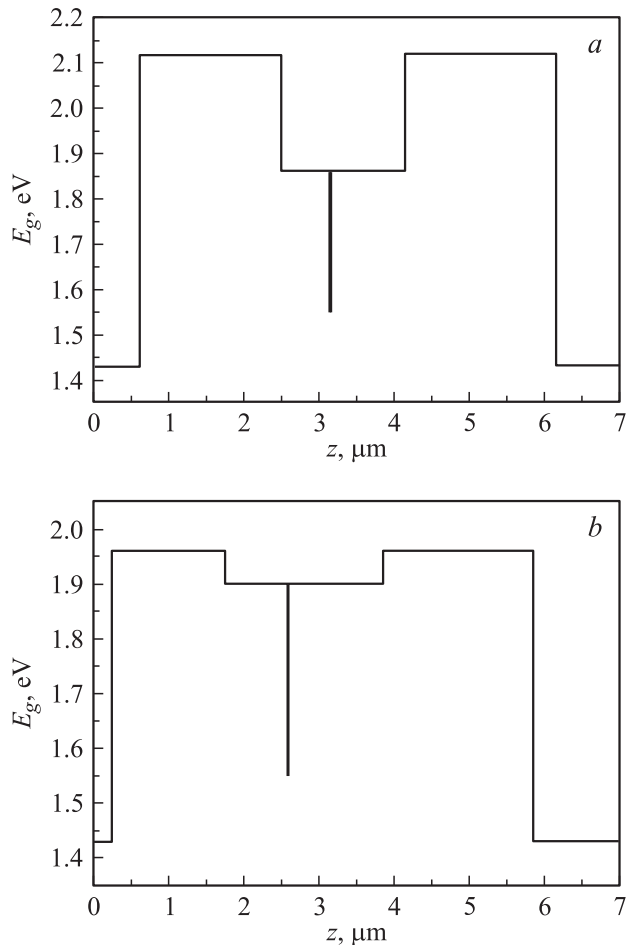
<sup>¶</sup> E-mail: a.murashova@mail.ioffe.ru

Цель настоящей работы заключалась в сравнении характеристик мощных полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 808 нм, полученных на основе асимметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом в системах твердых растворов AlGaAs/GaAs и (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs.

## 2. Экспериментальные образцы

Для эпитаксиального осаждения лазерных гетероструктур использовалась МОС-гидридная технология (газофазное осаждение из металлорганических соединений) пониженного давления. Температура роста составляла 725°C. В качестве источников элементов III группы использовались триметилалюминий, триметил- и триэтилгаллий, триметилиндий. В качестве источников элементов V группы использовались 100%-й арсин и 100%-й фосфин. Смесь силана с водородом использовалась в качестве лигатуры для получения *n*-типа проводимости, а диэтилцинк и бисциклопентадиенил магния — в качестве лигатуры для *p*-типа проводимости. В качестве газа-носителя использовался водород с точкой росы не выше –100°C. Рост осуществлялся на подложках *n*-GaAs (001).

При разработке конструкции лазерных гетероструктур в качестве базовой была выбрана хорошо себя зарекомендовавшая в процессе создания мощных полупроводниковых лазеров асимметричная двойная гетероструктура раздельного ограничения со сверхшироким волноводом [7,8]. Определение толщины волновода и положения в нем активной области было направлено на минимизацию внутренних оптических потерь с целью увеличения



**Рис. 1.** Энергетические зонные диаграммы асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения в системах AlGaAs/GaAs (а) и (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs (b).  $E_g$  — ширина запрещенной зоны,  $z$  — координата в направлении роста эпитаксиальных слоев.

максимальной мощности оптического излучения. В нашем случае внутренние оптические потери могут быть существенно снижены за счет расширения волновода. Однако это ведет к появлению мод высших порядков, которые значительно проникают в сильно легированные эмиттерные слои и эффективно поглощаются в них, что вызывает увеличение потерь и снижение оптической мощности лазера. Для подавления мод высших порядков используется асимметричная гетероструктура, в которой активная область сдвинута относительно центра волновода в ту точку, где фактор оптического ограничения фундаментальной моды максимален по сравнению с факторами оптического ограничения мод высших порядков. Для каждой из двух выбранных систем были вычислены оптимальные толщина волновода и смещение активной области.

В системе AlGaAs/GaAs лазерная гетероструктура состояла из эмиттерных слоев  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ , волноводных слоев  $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$  и активной области — квантовой ямы (КЯ)  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$  толщиной  $120 \text{ \AA}$ . Ширина

волновода составляла  $1.63 \text{ мкм}$ , активная область была смещена к эмиттеру  $p$ -типа проводимости на  $0.19 \text{ мкм}$  (рис. 1, а).

В системе (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs лазерная гетероструктура состояла из эмиттерных слоев  $(\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ , волноводных слоев  $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  и активной области — ненапряженной КЯ  $\text{Ga}_{0.87}\text{In}_{0.13}\text{As}_{0.75}\text{P}_{0.25}$  толщиной  $100 \text{ \AA}$ . Ширина волновода составляла  $2.1 \text{ мкм}$ , активная область была смещена к эмиттеру  $p$ -типа проводимости на  $0.21 \text{ мкм}$  (рис. 1, б).

В табл. 1 и 2 дано подробное описание выращенных лазерных гетероструктур. Лазерные гетероструктуры в системе (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs имели спейсеры — тонкие напряженные слои, которые использовались для повышения кристаллографического и оптического качества гетерограниц GaInP/GaInAsP.

С применением известных постростовых технологий из выращенных структур были изготовлены полупроводниковые лазеры с апертурой излучения  $100 \text{ мкм}$ . Из каждой структуры изготавливались партии лазеров с различной длиной резонатора от  $0.5$  до  $4.0 \text{ мм}$ , и исследовались их пороговые, мощностные и спектральные характеристики.

### 3. Экспериментальные результаты

Основные параметры, характеризующие гетероструктуру, — пороговая плотность тока, внутренний квантовый выход, внутренние оптические потери — измерялись на серии естественно сколотых образцов с разными длинами резонатора.

Основные электрические и оптические характеристики образцов — ватт-амперные, вольт-амперные характеристики, коэффициент полезного действия (кпд), расходимость пучка и спектры излучения — измерялись на образцах с напыленными просветляющими и отражающими покрытиями  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

Ватт-амперные характеристики измерялись в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре ( $25^\circ\text{C}$ ). Остальные выходные параметры измерялись до непрерывной рабочей мощности  $3 \text{ Вт}$  при комнатной температуре. Также проводились исследования КПД, ватт-амперных и вольт-амперных характеристик в диапазоне температур  $25\text{--}55^\circ\text{C}$ . Из этих измерений определялись коэффициенты температурной чувствительности пороговой плотности тока и дифференциальной эффективности.

Значения основных параметров тестированных лазерных диодов, полученных на основе двух материальных систем, суммированы в табл. 3. Значения приведены для лазеров с длиной резонатора  $3 \text{ мм}$ . Как видно из таблицы, параметры лазеров в обеих системах имеют близкие значения. Однако лазеры в системе (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs имеют более высокие значения максимальной оптической мощности, примерно на  $30\%$

**Таблица 1.** Асимметричная двойная гетероструктура раздельного ограничения в системе AlGaAs/GaAs

№ слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина
1	<i>n</i> -подложка	GaAs(001)	$2 \cdot 10^{18}$	350–400 мкм
2	<i>n</i> -эмиттер	Al <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As	$1 \cdot 10^{18}$ (Si)	2 мкм
3	волновод	Al <sub>0,32</sub> Ga <sub>0,68</sub> As	Не легирован	1.0 мкм
4	активная область (КЯ)	Al <sub>0,08</sub> Ga <sub>0,92</sub> As	» »	120 Å
5	волновод	Al <sub>0,32</sub> Ga <sub>0,68</sub> As	» »	0.63 мкм
6	<i>p</i> -эмиттер	Al <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As	$1 \cdot 10^{18}$ (Zn)	1.9 мкм
7	контактный <i>p</i> -слой	GaAs	$1 \cdot 10^{20}$ (Zn)	0.6 мкм

**Таблица 2.** Асимметричная двойная гетероструктура раздельного ограничения в системе (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs

№ слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина
1	<i>n</i> -подложка	GaAs(001)	$5 \cdot 10^{18}$	350–400 мкм
2	<i>n</i> -эмиттер	(Al <sub>0,10</sub> Ga <sub>0,90</sub> ) <sub>0,52</sub> In <sub>0,48</sub> P	$1 \cdot 10^{18}$ (Si)	2 мкм
3	волновод	Ga <sub>0,52</sub> In <sub>0,48</sub> P	Не легирован	1.26 мкм
4	спейсер	Ga <sub>0,93</sub> In <sub>0,07</sub> As <sub>0,5</sub> P <sub>0,5</sub>	» »	20 Å
5	активная область (КЯ)	Ga <sub>0,87</sub> In <sub>0,13</sub> As <sub>0,75</sub> P <sub>0,25</sub>	» »	100 Å
6	спейсер	Ga <sub>0,93</sub> In <sub>0,07</sub> As <sub>0,5</sub> P <sub>0,5</sub>	» »	20 Å
7	волновод	Ga <sub>0,52</sub> In <sub>0,48</sub> P	» »	0.84 мкм
8	<i>p</i> -эмиттер	(Al <sub>0,10</sub> Ga <sub>0,90</sub> ) <sub>0,52</sub> In <sub>0,48</sub> P	$3 \cdot 10^{18}$ (Mg)	1.5 мкм
9	контактный <i>p</i> -слой	GaAs	$5 \cdot 10^{18}$ (Mg)	0.25 мкм

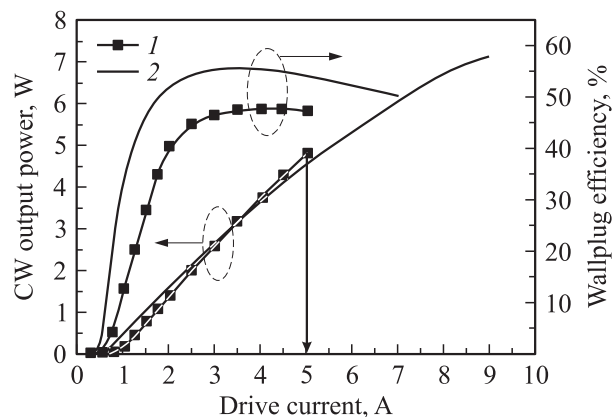
**Таблица 3.** Параметры лазеров в двух системах

Параметр	AlGaAs/GaAs	(Al)GaInP/GaInAsP/GaAs
Пороговая плотность тока при бесконечной длине резонатора $J_0$ , А/см <sup>2</sup>	170	150
Внутренний квантовый выход $\eta_i$ , %	>90	99
Внутренние оптические потери $\alpha_i$ , см <sup>-1</sup>	0.5	0.8
Максимальная выходная оптическая мощность $P_{max}$ , Вт	4.7	7.0
Коэффициент полезного действия $\eta_c$ , %	50*	55*
Расходимость излучения в вертикальной плоскости $\theta_{\perp}$ , град	26*	21*
Коэффициент температурной чувствительности порогового тока $T_0$ , К	160	200
Коэффициент температурной чувствительности дифференциальной эффективности $T_1$ , К	—	400

Примечание. \* — измерения проводились на рабочей мощности 3 Вт.

превышающие максимальную оптическую мощность лазеров в системе AlGaAs/GaAs.

На рис. 2 приведены типичные ватт-амперные характеристики лазеров с длиной резонатора 3 мм на основе двух материальных систем. В лазерах на основе системы AlGaAs/GaAs, содержащих алюминий во всех слоях лазерной гетероструктуры, происходила катастрофическая оптическая деградация зеркал при плотности оптической мощности 3 МВт/см<sup>2</sup>. По этой причине не достигалось характерное для непрерывного режима генерации насыщение ватт-амперной характеристики. В лазерах на основе (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs, не содержащих алюминий в активном и волноводном слоях, оптическая мощность была ограничена термическим насыщением при плотности оптической мощности на зеркале 3.5 МВт/см<sup>2</sup>. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой надежности лазеров на основе



**Рис. 2.** Ватт-амперные характеристики и зависимости КПД от тока накачки в непрерывном режиме генерации (CW) для лазеров с длиной волны 808 нм на основе систем AlGaAs/GaAs (1) и (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs (2).

(Al)GaInP/GaInAsP/GaAs при использовании покрытий SiO<sub>2</sub>/Si и дают основания для предположений о большем сроке службы этих лазеров по сравнению с такими же лазерами на основе AlGaAs/GaAs.

#### 4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены асимметричные лазерные квантово-размерные гетероструктуры раздельного ограничения со сверхшироким волноводом в системах твердых растворов AlGaAs/GaAs и (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs, излучающие на длине волны 808 нм. На их основе изготовлены меза-полосковые лазеры с апертурой 100 мкм, и исследованы излучательные характеристики лазеров.

В лазерах на основе AlGaAs/GaAs максимальная оптическая мощность была ограничена катастрофической оптической деградацией зеркал SiO<sub>2</sub>/Si и составила 4.7 Вт. В лазерах на основе (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs максимальная оптическая мощность была ограничена термическим насыщением и составила 7 Вт. Полученные результаты еще раз доказали преимущество не содержащих алюминий твердых растворов при изготовлении лазеров с использованием покрытий SiO<sub>2</sub>/Si.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-08183-офи), программ Президиума академии наук „Квантовые наноструктуры“ и Отделения физических наук „Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур“.

#### Список литературы

- [1] T. Fukunaga, M. Wada, H. Asano, T. Hayakawa. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, pt 2 (9B), L1175 (1995).
- [2] J.K. Wade, L.J. Mawst, D. Botez, R.F. Nabiev, M. Jansen, J.A. Morris. *Appl. Phys. Lett.*, **72** (1), 4 (1998).
- [3] T. Fukunaga, M. Wada, T. Hayakawa. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, pt 2 (4A), L387 (1999).
- [4] N. Tansu, D. Zhou, L.J. Mawst. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12** (6), 603 (2000).
- [5] R.M. Lammert, M.L. Osowski, S.W. Oh, C. Panja, J.E. Ungar. *Electron. Lett.*, **42** (9), 535 (2006).
- [6] А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. *ФТП*, **40** (5), 628 (2006).
- [7] N.A. Pikhitin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. *Electron. Lett.*, **40**, 1413 (2004).
- [8] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.В. Муршова, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. *ФТП*, **39**, 388 (2005).

Редактор Л.В. Шаронова

#### High power 808 nm laser diodes based on different types of asymmetric heterostructures with ultra-thick waveguide

V.V. Bezotosnyy\*, V.V. Vasilyeva, S.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, O.N. Krokhin\*, A.V. Lyutetskiy, A.V. Murashova, T.A. Nalet, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhitin, Yu.M. Popov\*, S.O. Slipchenko, A.L. Stankevich, N.V. Fetisova, V.V. Shamakhov, I.S. Tarasov

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\* P.N. Lebedev Physical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
117924 Moscow, Russia

**Abstract** In the present paper the characteristics of high-power multimode 808 nm laser diodes based on asymmetric heterostructures with ultra-thick waveguide and grown in AlGaAs/GaAs and (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs alloy systems have been compared. The maximum output optical power of lasers based on AlGaAs/GaAs system was limited by catastrophic optical mirror damage and came to 4.7 W. The maximum output optical power of lasers based on (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs system was limited by thermal rollover and reached 7 W. The results obtained have shown that (Al)GaInP/GaInAsP/GaAs system is more reliable in respect to the increase of laser maximum output optical power and lifetime.