

# GaInAsP/GaInP/AlGaInP-лазеры, излучающие на 780 нм, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии

© Д.А. Винокуров<sup>¶</sup>, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, 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

(Получена 19 мая 2003 г. Принята к печати 20 мая 2003 г.)

Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений и гидридов (МОС-гидридной эпитаксии) были получены лазерные гетероструктуры в системе твердых растворов GaInAsP/GaInP/AlGaInP. Конструкция лазерной структуры была выбрана на основании расчета разрывов зон на гетерогранице в активной области волновода. На мезаполосковых лазерных диодах с шириной полоска  $W = 5$  мкм была получена в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения 320 мВт с длиной волны излучения 780 нм.

## 1. Введение

Лазерные диоды, излучающие на длине волны 780 нм, используются для систем компьютерной памяти, высокоразрешающей лазерной печати, в спектроскопии, медицине и для накачки твердотельных лазеров. Для производства таких лазерных диодов обычно используется система AlGaAs/GaAs с активной областью AlGaAs.

Однако ранее было показано [1,2], что система, не содержащая алюминий в активной области, для лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 800–980 нм, продемонстрировала высокие мощностные характеристики. При этом были получены пороги оптической деградации зеркал (COMD), почти в 2 раза превышающие такие же характеристики у лазеров на основе AlGaAs/GaAs [3]. Это объясняется тем, что высокая способность Al к окислению приводит к увеличению концентрации кислорода в активной области и, следовательно, к объемной деградации в лазерной структуре. Кроме того, более высокая скорость поверхностной рекомбинации Al-содержащих слоев по сравнению со слоями на основе соединений GaInAsP приводит к уменьшению уровня COMD [3].

Однако при получении мощных лазерных диодов в системе GaInAsP/GaInP, излучающих на длину волны короче 800 нм, сталкиваются с рядом проблем.

— Твердые растворы (ТР) GaInAsP, согласованные с подложками GaAs, с ширинами запрещенных зон, соответствующими длинам волн 700–800 нм, попадают в область неустойчивости [4,5]. Это может привести к спинодальному распаду ТР и, следовательно, к ухудшению мощностных и пороговых характеристик лазерных диодов.

— Для лазерных гетероструктур в системе GaInP/GaInAsP [6] при уменьшении длины волны генерации до 760–780 нм существенным становится выброс носителей из активной области вследствие малых величин разрыва зон между активной областью и ограничивающими слоями. Для уменьшения утечек

необходимо использовать более широкозонные материалы, такие как AlGaAs и AlGaInP.

Для решения этих проблем используют три основных способа.

1. Применение AlGaAs в качестве широкозонного эмиттерного слоя, GaInP — волноводного слоя и GaInAsP — активной области [7] позволяет увеличить разрыв зон на границе (активная область)–волновод. Однако, как будет показано далее, гетеропереход  $Al_xGa_{1-x}As/GaInP$  при используемых составах ( $x$ ) может быть второго рода, что вносит дополнительные потери в лазерных диодах.

2. В работах [8–10] рассматриваются лазерные структуры, содержащие растянуто-напряженную активную область GaAsP, а также волноводные и эмиттерные слои на основе соединений AlGaAs. При этом решается проблема неустойчивости ТР в активной области. Однако большие напряжения в слое GaAsP (1%) с шириной запрещенной зоны, соответствующей длине волны 760 нм, а также сложность формирования гетерограниц AlGaAs/GaAsP увеличивают скорость деградации лазерных диодов. Тем не менее в такой системе получена максимальная из известных нам мощность 6.4 Вт на длине волны 780 нм при ширине полоска 100 мкм [8].

3. В работах [3,11] используются четверные ТР AlGaInP и GaInAsP в качестве эмиттерных и активных слоев для излучения в диапазоне 700–780 нм. В качестве волноводных слоев используются ТР GaInP. На таких структурах были достигнуты мощности до 3 Вт на длине волны излучения 732 нм с апертурой 100 мкм.

## 2. Экспериментальная установка

Получение гетероструктур осуществлялось на установке МОС-гидридной эпитаксии Emcore GS3100 с вертикальным типом реактора. Процесс роста осуществлялся при пониженном давлении, равном 77 Торр, скорости вращения подложкодержателя 1000 об/мин и температуре 700°C. В качестве реагентов использовались

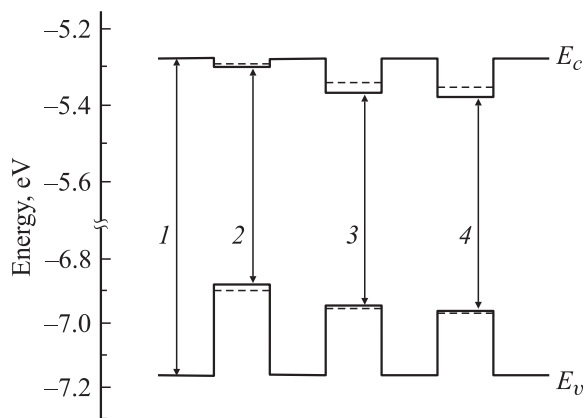
<sup>¶</sup> E-mail: dmitry.vinokurov@pop.ioffe.rssi.ru

триметилгаллий (TMGa), триметилиндий (TMIn), триметилалюминий (TMAI), арсин ( $\text{AsH}_3$ ) и фосфин ( $\text{PH}_3$ ). В качестве легирующих примесей *p*- и *n*-типа использовались бисциклопентодиенилмагний ( $\text{Cp}_2\text{Mg}$ ) и моносилан ( $\text{SiH}_4$ ) соответственно. Газом-носителем являлся водород.

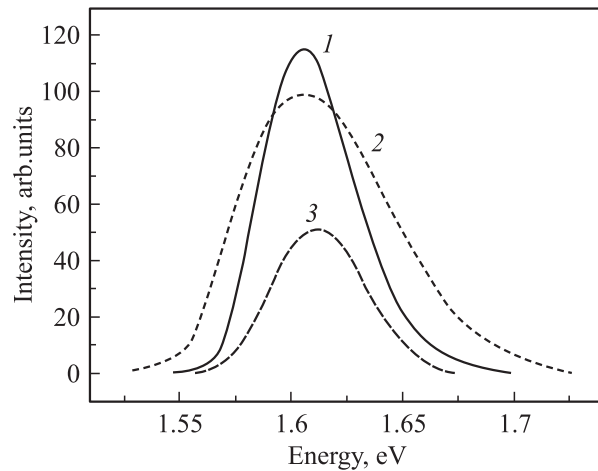
### 3. Обоснование выбора лазерной гетероструктуры

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились для изотипных двойных гетероструктур  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}(\text{In})\text{AsP}/\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ , выращенных на подложках GaAs(100). Структуры не легировались и концентрация электронов, обусловленная фоновыми примесями, не превышала  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Для исследования в качестве активной области брались напряженные слои  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$  ( $\Delta a/a = -0.8\%$ ) и  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  ( $\Delta a/a = 0.2\%$ ), а также  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ , согласованный по периоду решетки с GaAs.

Предварительно для данных твердых растворов (ТР) был проведен расчет разрывов зон с учетом напряжений относительно  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ . Расчет проводился согласно [12]. Значения ширины запрещенных зон вычислялись по интерполяционным зависимостям, приведенным в работе [13]. Кроме того, были учтены эффекты размерного квантования. Составы подбирались исходя из условия, чтобы с учетом напряжений и квантово-размерных эффектов полоса максимума спектра фотолюминесценции приходилась на длину волны 770 нм. На рис. 1 схематически изображено расположение валентной зоны и зоны проводимости исследуемых твердых растворов относительно  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ , а также первый уровень квантования. Из рисунка видно, что для всех исследуемых ТР наблюдается переход I рода. Самую глубокую квантовую



**Рис. 1.** Схематическое изображение энергетической зонной диаграммы двойной гетероструктуры, состоящей из широкозонного твердого раствора  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  и активной области  $\text{Ga}(\text{In})\text{AsP}$ : 1 —  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ , 2 —  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ , 3 —  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ , 4 —  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ . Штриховые линии — уровни размерного квантования.



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции при температуре 300 К твердых растворов  $\text{Ga}(\text{In})\text{AsP}$ : 1 —  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ , 2 —  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ , 3 —  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ .

яму для электронов имеет напряженный четверной ТР, а самую мелкую — тройной ТР  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ .

На рис. 2 приведены типичные спектры ФЛ для твердых растворов при температурах 300 К. Из спектров видно, интенсивность пика фотолюминесценции для тройного ТР существенно меньше, чем для четверных. Этот факт можно связать с тем, что GaAsP имеет мелкую квантовую яму для электронов и, следовательно, больший термический выброс носителей из нее по сравнению с четверными ТР. На основании этого в качестве активной области были выбраны четверные ТР. Исследования фотолюминесценции четверных ТР показали, что полуширина спектра ненапряженного ТР существенно шире (75 мэВ), чем для напряженного (50 мэВ), и спектр сильно затянут в высокоэнергетическую область. Данные особенности в спектре ФЛ ненапряженного слоя ТР объясняются неоднородностями состава, которые могут возникнуть вследствие распада ТР, соответствующего по составу области неустойчивости [14–16]. Спектр ФЛ напряженного слоя соответствует спектрам ФЛ однородных ТР, описанным в литературе [17], несмотря на то что он по составу также лежит в области неустойчивости. В этом случае осаждение слоя, однородного по составу, происходит благодаря напряжениям, возникающим между подложкой и слоем. Как известно [18], упругая энергия, вызываемая подложкой, оказывает стабилизирующее действие на неустойчивые ТР и препятствует их распаду. На основании проведенного анализа спектров ФЛ исследуемых ТР нами в качестве активной области лазерной гетероструктуры был выбран напряженный четверной ТР.

Свойства лазерной структуры также во многом определяются морфологией и кристаллографическим совершенством слоев, используемых в качестве волновода и эмиттера. В качестве волновода нами использовался  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ , как материал, имеющий максимальную

ширину запрещенной зоны среди ТР несодержащих алюминий. Для эмиттера использовался твердый раствор  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  ( $x = 0.18$ ). Выбор данного материала в качестве эмиттерного слоя был обусловлен тем, что он образует с  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  переход I рода во всем диапазоне составов [19], в то время как по нашим расчетам, проведенным согласно [12],  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  образует с  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  в диапазоне составов  $0.15 \leq x \leq 0.6$  гетеропереход II рода. Использование составов, находящихся в данном интервале, приводит к дополнительным потерям излучения. Кроме того, получение таких слоев с высоким содержанием Al приводит к ряду технологических трудностей. Во-первых, в таких слоях тяжело обеспечить достаточно высокую концентрацию легирующей примеси  $n$ -типа; во-вторых, из-за большой активности алюминия в процессе роста происходит размытие гетероперехода на границе GaInP/GaAs, что приводит к ухудшению свойств лазерной структуры. Используемые в качестве волновода и эмиттера ТР имели рассогласование периодов решеток с подложкой, не превышающее  $\Delta a/a = \pm 0.1\%$ . Энергии максимумов фотолюминесценции  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  и  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  при комнатной температуре составили 1.88 эВ и 2.05 эВ соответственно.

#### 4. Экспериментальные результаты

Лазерные гетероструктуры выращивались на подложках  $n^+$ -GaAs (100). На рис. 3 приведено схематическое изображение такой структуры. Структура состоит из буферного слоя  $n$ -GaAs толщиной 0.5 мкм, эмиттерных слоев  $n$ - и  $p$ - $(\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.72})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  толщиной 1 мкм, нелегированных волноводных слоев  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  толщиной 0.3 мкм и квантовой ямы в напряженном ТР  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$  толщиной порядка 100 Å, а также контактного слоя  $p$ -GaAs толщиной 0.3 мкм.

$p$ -GaAs contact layer
$p$ -AlGaInP emitter
GaInP waveguide
GaInAsP QW active layer
GaInP waveguide
$n$ -AlGaInP emitter
$n$ -GaAs buffer
GaAs substrate

Рис. 3. Схематическое изображение лазерной гетероструктуры GaInAsP/GaInP/AlGaInP.

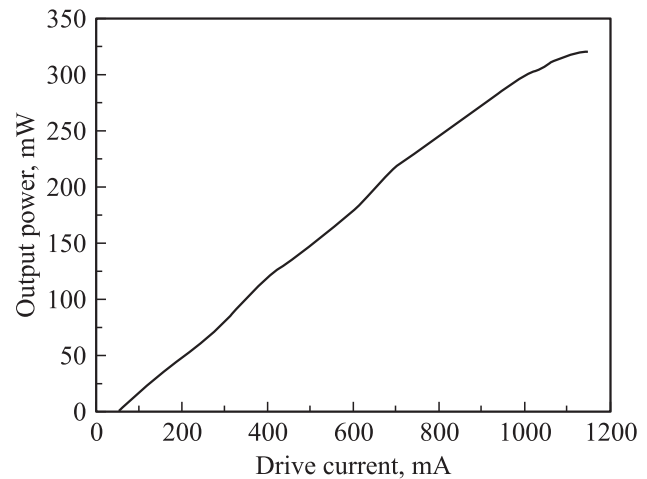


Рис. 4. Ватт-амперная характеристика гетеролазера на основе GaInAsP/GaInP/AlGaInP в непрерывном режиме генерации при температуре 293 К (длина резонатора  $L = 2000$  мкм и ширина полоска  $W = 5$  мкм).

Из лазерных гетероструктур отдельного ограничения GaInAsP/GaInP/AlGaInP/GaAs изготавливались мезаполосковые лазерные диоды с узким полоском  $W = 4-7$  мкм, излучающие на длину волны  $\lambda = 780$  нм. Для изготовления мезаполосковой конструкции использовалась установка сухого плазменного травления Alcatel. Меза-полосок создавался за счет травления канавки шириной 10 мкм в пассивной области гетероструктуры на необходимую глубину. Глубина контролировалась с помощью электронного микроскопа CamScan-S4-90FE методом вторичной электронной микроскопии. После травления на пассивную область наносился изолирующий слой  $\text{SiO}_2$  толщиной  $d = 0.15$  мкм. Далее, на  $p$ - и  $n$ -области структуры наносились омические контакты, Au/Zn/Au и Au/Ge/Au соответственно. Для исследования характеристик диоды монтировались полосковым контактом вниз на медный теплоотвод. На торцы резонатора Фабри-Перо наносились диэлектрические зеркала  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . На данных структурах удалось в непрерывном режиме достигнуть мощности 320 мВт, а пороговый ток был равен  $I_{\text{th}} = 50$  мА. Ватт-амперная характеристика приведена на рис. 4.

#### 5. Заключение

В рамках данной работы был проведен анализ составов несодержащей Al лазерной гетероструктуры, излучающей на длину волны  $\sim 780$  нм.

Теоретический расчет разрывов зон для твердых растворов Ga(In)AsP, используемых в качестве активной области ( $\lambda = 770$  нм), относительно волноводного слоя GaInP показал, что наименьшую глубину залегания квантовой ямы для электронов имеет тройной ТР  $\text{GaAs}_{0.77}\text{P}_{0.23}$ , а самую глубокую — напряженный четверной ТР  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ . Фотолюминес-

центные исследования показали, что наиболее подходящим материалом в качестве активной области является  $\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.26}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$ .

На основании проведенных исследований методом МОС-гидридной эпитаксии были получены лазерные гетероструктуры GaInAsP/GaInP/AlGaInP/GaAs с напряженной активной областью, излучающие на длину волны 780 нм, из которых затем изготавливались мезаполосковые лазерные диоды. Для лазерных диодов с шириной полоска  $W = 5$  мкм и длиной резонатора  $L = 2$  мм были достигнуты мощности 320 мВт и пороговые токи 50 мА.

Авторы выражают признательность А.И. Мурашовой и З.Н. Соколовой за плодотворное обсуждение результатов.

Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 01-02-17851, 01-02-17842 и гранта МНТП России „Физика твердотельных наноструктур“.

## Список литературы

- [1] J.K. Wade, L.J. Mawst, D. Botez, J.A. Morris. *Electron. Lett.*, **34**, 1100 (1998).
- [2] A. Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, J.C. Connolly. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1182 (1998).
- [3] L.J. Mawst, S. Rusli, A. Al-Muhanna, J.K. Wade. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **5**, 785 (1999).
- [4] R. Kudela, M. Morvic. *Phys. St. Sol. (a)*, **95**, K1 (1986).
- [5] Л.С. Вавилова, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, И.С. Тарасов. *ФТП*, **34**, 1307 (2000).
- [6] W.E. Plano, K.S. Major, D.F. Welch. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **6**, 465 (1994).
- [7] T. Fukunaga, M. Wada, H. Asano, T. Hayakawa. *Jap. J. Appl. Phys.*, **34**, L1175 (1995).
- [8] G. Erbert, F. Bugge, A. Knauer, J. Sebastian, A. Thies, H. Wenzel, M. Weyers, G. Tränkle. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **5**, 780 (1999).
- [9] J. Sebastian, G. Beister, F. Bugge, F. Buhardt, G. Elbert, H.G. Hänsel, R. Hülsweide, A. Knauer, W. Pittroff, R. Staske, M. Schröder, H. Wenzel, M. Weyers, C. Tränkle. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **7**, 334 (2001).
- [10] F. Agahi, K.M. Lau, H.K. Choi, A. Baliga, N.G. Anderson. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **7**, 140 (1995).
- [11] N. Tansu, D. Zhou, L.J. Mawst. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **12**, 603 (2000).
- [12] M.P.C.M. Krijn. *Semicond. Sci. Technol.*, **6**, 27 (1991).
- [13] R.E. Nahory, M.A. Pollack, W.D. Johnston, jr., R.L. Barns. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 659 (1978).
- [14] S. Mukai. *J. Appl. Phys.*, **54**, 2635 (1983).
- [15] E. Kuphal. *J. Cryst. Growth.*, **67**, 441 (1984).
- [16] Н.А. Берг, Л.С. Вавилова, И.П. Ипатов, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, А.А. Ситникова, И.С. Тарасов, В.А. Щукин. *ФТП*, **33**, 544 (1999).
- [17] S. Mukai, M. Matsuzaki, J. Shimada. *Jap. J. Appl. Phys.*, **19**, L505 (1980).
- [18] M. Quillec, C. Daguet, J.L. Benchimol, H. Launios. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 325 (1982).
- [19] M.O. Watanabe, Y. Ohba. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 906 (1987).

Редактор Т.А. Полянская

## MOCVD-grown GaInAsP/GaInP/AlGaInP lasers emitting at 780 nm wavelength

*D.A. Vinokurov, S.A. Zorina, V.A. Kapitonov, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, A.L. Stankevich, N.V. Fetisova, V.V. Shamakhov, I.S. Tarasov*

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

**Abstract** Laser heterostructures based on GaInAsP/GaInP/AlGaInP solid solution system has been grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) epitaxy. Heterostructure design has been developed on the base of energy band offset analysis and photoluminescence investigations. Continuous wave output optical power of 320 mW per facet has been achieved in mesastripe construction laser diodes with  $W = 5$  μm stripe width emitting at 780 nm wavelength.