

# Лазеры с сильнонапряженной квантовой ямой GaInAs с компенсирующими слоями GaAsP, излучающие на длине волны 1220 нм, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs

© Д.А. Винокуров<sup>¶</sup>, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, А.Д. Бондарев, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов

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

(Получена 14 марта 2011 г. Принята к печати 21 марта 2011 г.)

Проведены фотолюминесцентные исследования гетероструктур с активной областью, состоящей из квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$ , помещенной между компенсирующими слоями  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ . Показано, что с увеличением содержания фосфора P в компенсирующих слоях можно получить нерелаксированную гетероструктуру с квантовой ямой  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  большей толщины. На основании фотолюминесцентных исследований выбраны параметры составной активной области для обеспечения максимальной длины волны излучения. Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs выращены лазерные гетероструктуры с активной областью, состоящей из сильнонапряженной квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$ , помещенной между компенсирующими слоями  $\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$ . Изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой 100 мкм, излучающие на длине волны 1220 нм. Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме генерации для лазерных диодов составила 2 Вт на зеркало.

## 1. Введение

В настоящее время повышенный интерес вызывают лазеры, излучающие в диапазоне длин волн 1150–1300 нм. Лазеры данного спектрального диапазона могут использоваться в волоконной оптике, оптических усилителях и при накачке волоконных лазеров, легированных висмутом. В настоящее время для создания таких лазеров используют лазерные гетероструктуры, выращенные на подложках InP [1–3]. На сегодняшний день проявляется сильный интерес к получению лазеров данного спектрального диапазона на основе гетероструктур, выращенных на подложках GaAs, поскольку такие лазеры должны иметь более высокую температурную стабильность характеристик из-за более сильной локализации носителей заряда в активной области по сравнению с лазерами, выращенными на подложках InP. Однако достижение длинноволновой генерации структур, выращенных на подложках GaAs, ограничено процессом образования дислокаций вследствие больших напряжений, возникающих из-за значительного рассогласования параметров кристаллических решеток подложки и слоя активной области.

Данная работа продолжает цикл работ [4–7] по созданию и исследованию лазеров с сильнонапряженной активной областью, выращенных на подложке GaAs, с целью получения длинноволнового излучения. Ранее нами были получены лазеры с длиной волны излучения 1190 нм [6,7]. В работе [6] активная область лазера представляла собой сильнонапряженную квантовую яму GaInAs. При этом лазеры, полученные из одной гетероструктуры, имели разброс по максимально

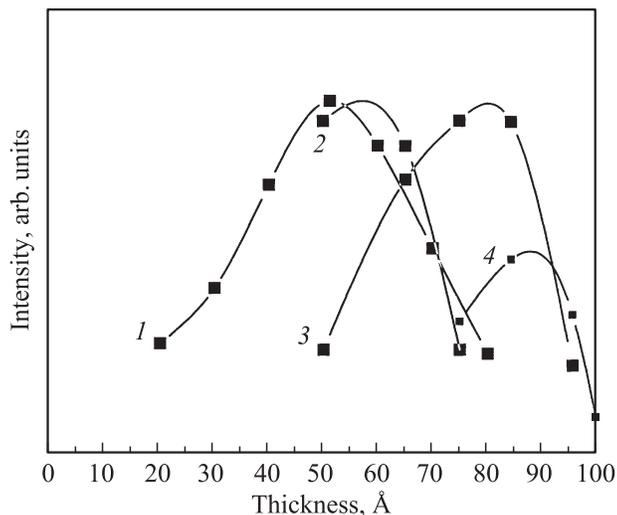
достигаемой мощности излучения: она составляла от 2.5 до 5.5 Вт на зеркало. Это, по нашему мнению, является следствием релаксации слоя квантовой ямы. В работе [7] нами для избежания релаксации слоя квантовой ямы были использованы компенсирующие барьеры GaAsP. В результате использования компенсирующих барьеров удалось добиться стабилизации мощностных характеристик лазеров, т.е. отсутствия разброса максимально достигаемой мощности для лазеров, полученных из одной гетероструктуры. На основании этих исследований для дальнейшего продвижения в более длинноволновую область нами были использованы компенсирующие барьеры вблизи сильнонапряженной квантовой ямы.

В данной работе исследовано влияние компенсирующих барьеров GaAsP на фотолюминесцентные характеристики сильнонапряженной квантовой ямы GaInAs с целью подобрать параметры слоев, позволяющих увеличить длину волны излучения при условии сохранения высокого квантового выхода. На основании данных исследований были выращены лазерные гетероструктуры и из них изготовлены лазерные диоды. Проведены исследования оптических характеристик таких лазеров.

## 2. Фотолюминесцентные исследования

Для исследований использовалась фотолюминесцентная гетероструктура с составной активной областью, заключенной в волноводные слои GaAs суммарной толщиной 1 мкм, которые, в свою очередь, были ограничены широкозонными слоями твердого раствора  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  толщиной 0.3 мкм. Составная активная область представляла собой квантовую яму  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$ , помещенную между компенсирующими

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



**Рис. 1.** Зависимости интенсивности максимума спектра фотолюминесценции гетероструктуры от толщины квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  при использовании компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  ( $2 \times 150 \text{ \AA}$ ) различных составов.  $y$ : 1 — 0, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.15.

слоями  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  толщиной по  $150 \text{ \AA}$ , отделенными от квантовой ямы слоями  $\text{GaAs}$  толщиной по  $20 \text{ \AA}$ . Исследования фотолюминесцентных свойств проводились при комнатной температуре ( $300 \text{ K}$ ).

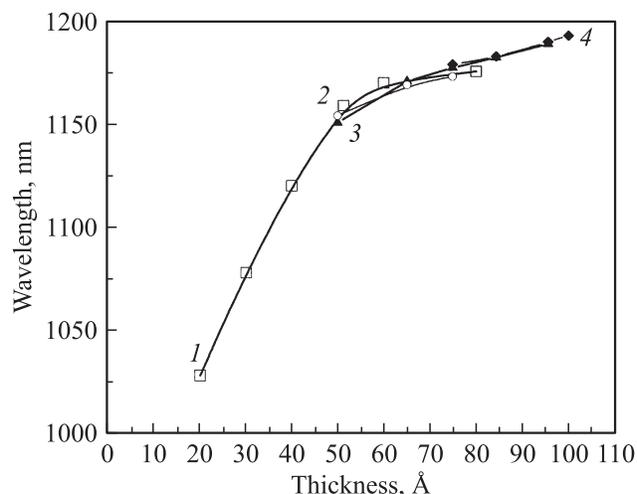
На рис. 1 приведены зависимости интенсивности максимума спектра фотолюминесценции гетероструктуры от толщины квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  при использовании компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  (2 слоя по  $150 \text{ \AA}$ ) различных составов. Из зависимостей видно, что использование компенсирующих барьеров позволяет увеличивать толщину квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  без резкого ухудшения излучательных характеристик гетероструктуры. Также видно, что с увеличением доли фосфора P в компенсирующем слое  $\text{GaAsP}$  максимум интенсивности спектра фотолюминесценции смещается в область больших толщин квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$ . При этом максимумы спектров лежат вблизи расчетных значений критической толщины для составной активной области, рассчитанной согласно [8]. Уменьшение интенсивности максимума для спектра с компенсирующими барьерами  $\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$  (кривая 4) относительно остальных связано, по нашему мнению, с образованием достаточно высокого потенциального барьера для носителей заряда, образуемого слоем  $\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$  между квантовой ямой и волноводными слоями, который препятствует эффективному их сбору в квантовой яме  $\text{GaInAs}$ .

На рис. 2 приведены зависимости длины волны максимума спектра фотолюминесценции гетероструктур от толщины квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  при использовании компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  (2 слоя по  $150 \text{ \AA}$ ) различных составов. Из зависимостей видно, что в гетероструктуре с квантовой ямой  $90 \text{ \AA}$  можно

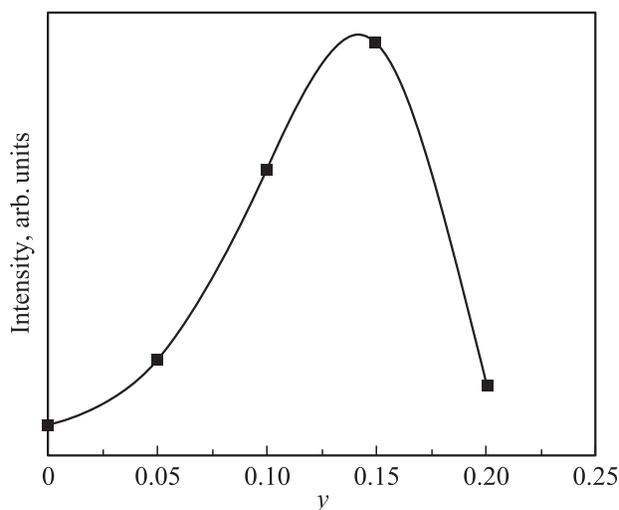
достичь длины волны фотолюминесценции  $1185 \text{ nm}$  с сохранением высокой интенсивности излучения.

На рис. 3 приведена зависимость интенсивности максимума спектра фотолюминесценции квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  толщиной  $90 \text{ \AA}$  от состава (от  $y$ ) компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  (2 слоя по  $150 \text{ \AA}$ ). Из рисунка видно, что максимум зависимости приходится на состав компенсирующего барьера  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  с  $y = 0.15$ .

Зависимость длины волны максимума спектра фотолюминесценции для квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  толщиной  $90 \text{ \AA}$  от состава компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  (2 слоя по  $150 \text{ \AA}$ ) приведена на рис. 4.



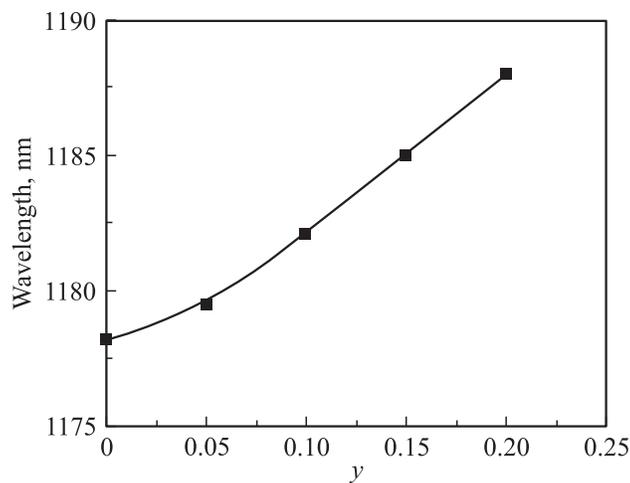
**Рис. 2.** Зависимости длины волны максимума спектра фотолюминесценции гетероструктур от толщины квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  при использовании компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  ( $2 \times 150 \text{ \AA}$ ) различных составов.  $y$ : 1 — 0, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.15.



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности максимума спектра фотолюминесценции для квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  толщиной  $90 \text{ \AA}$  от содержания фосфора  $y$  в компенсирующих барьерах  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  ( $2 \times 150 \text{ \AA}$ ).

## Описание лазерной гетероструктуры

№ слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, $\text{см}^{-3}$	Толщина
1	<i>n</i> -подложка	GaAs (100)	$2 \cdot 10^{18}$	350 мкм
2	<i>n</i> -буфер	GaAs:Si	$2 \cdot 10^{18}$	0.5 мкм
3	<i>n</i> -эмиттер	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}:\text{Si}$	$8 \cdot 10^{17}$	2.0 мкм
4	волновод	GaAs	Не легирован	1.05 мкм
5	компенсирующий слой	$\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$	Не легирован	150 Å
6	разделительный слой	GaAs	Не легирован	20 Å
7	активная область (КЯ)	$\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$	Не легирован	90 Å
8	разделительный слой	GaAs	Не легирован	20 Å
9	компенсирующий слой	$\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$	Не легирован	150 Å
10	волновод	GaAs	Не легирован	0.75 мкм
11	<i>p</i> -эмиттер	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}:\text{Mg}$	$2 \cdot 10^{18}$	1.5 мкм
12	контактный <i>p</i> -слой	GaAs:Mg	$2 \cdot 10^{19}$	0.3 мкм



**Рис. 4.** Зависимость длины волны максимума спектра фотолюминесценции для квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  толщиной 90 Å от содержания фосфора  $y$  в компенсирующих барьерах  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  ( $2 \times 150$  Å).

Видно, что длина волны слабо возрастает с увеличением доли фосфора P в составе компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ , что связано, по нашему мнению, с изменением энергии электронных состояний в квантовой яме под влиянием напряжений компенсирующих слоев.

На основании фотолюминесцентных исследований нами были выбраны следующие параметры составной активной области: квантовая яма  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  толщиной 90 Å и компенсирующие слои  $\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$  толщиной по 150 Å.

### 3. Экспериментальные образцы

Лазерные структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) на установке

EMCORE GS 3100 с вертикальным типом реактора и резистивным нагревом подложкодержателя. Давление в реакторе — 77 Торр, скорость вращения подложкодержателя — 1000 об/мин. В качестве источников служили триметилгаллий  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ , триметилалюминий  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ , триметилиндий  $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ , фосфин  $\text{PH}_3$  и арсин  $\text{AsH}_3$ . В качестве легирующей примеси для получения *p*- и *n*-типа проводимости использовались моносилан  $\text{SiH}_4$  и бисциклопентадиенил магния  $\text{Mg}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  соответственно.

Структура выращивалась при температуре 600°C, кроме эмиттерных слоев, которые выращивались при 750°C. Температура роста эмиттерных слоев была выбрана исходя из того, чтобы обеспечить высокий уровень их легирования. Описание лазерной гетероструктуры приведено в таблице.

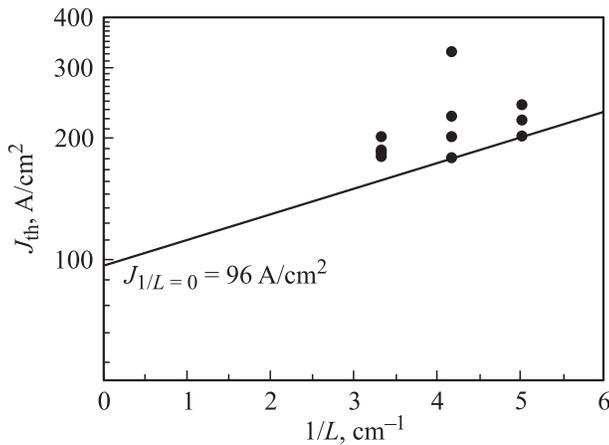
Из выращенных лазерных гетероструктур с использованием стандартных постростовых технологий [9,10] были изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой излучения  $W = 100$  мкм и различными длинами резонатора  $L = 2000 - 3500$  мкм.

### 4. Характеристики лазеров

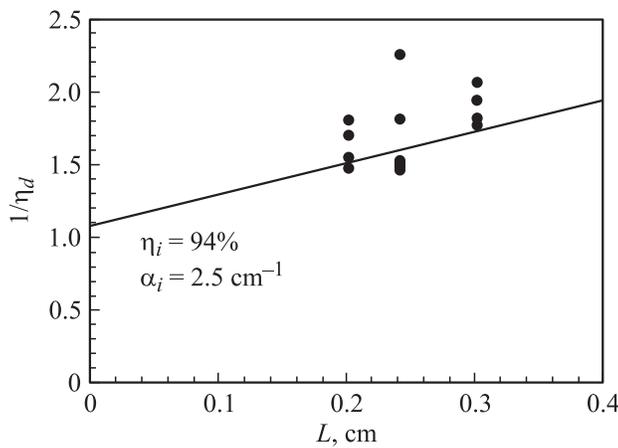
Исследования проводились в непрерывном режиме генерации при фиксированной температуре теплоотвода 25°C.

Пороговые характеристики измерялись в зависимости от обратной длины резонатора  $1/L$  (рис. 5). Из зависимости порогового тока  $J_{\text{th}}$  от  $1/L$ , приведенной на рис. 3, при длине резонатора  $L \rightarrow \infty$  определялось минимальное значение пороговой плотности тока  $J_{1/L}$ , соответствующей нулевым потерям на выход из резонатора Фабри–Перо. Данное значение составило 96 А/см<sup>2</sup>.

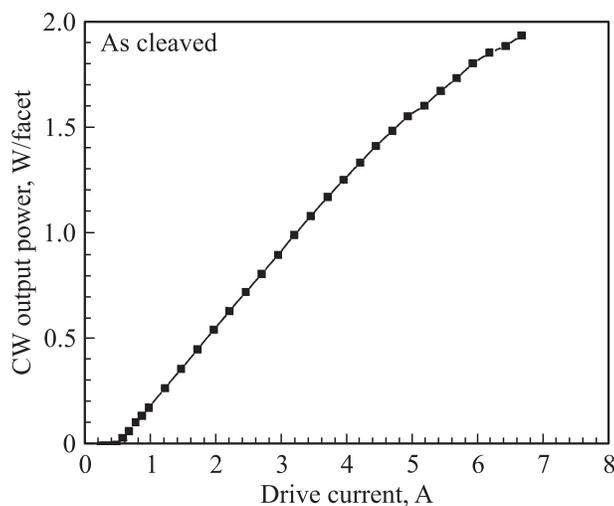
Исследовалась зависимость дифференциальной эффективности ( $\eta_d$ ) от длины резонатора Фабри–Перо (рис. 6). Из рис. 6 при бесконечно малой длине резонатора определялось значение квантового выхода стимулиро-



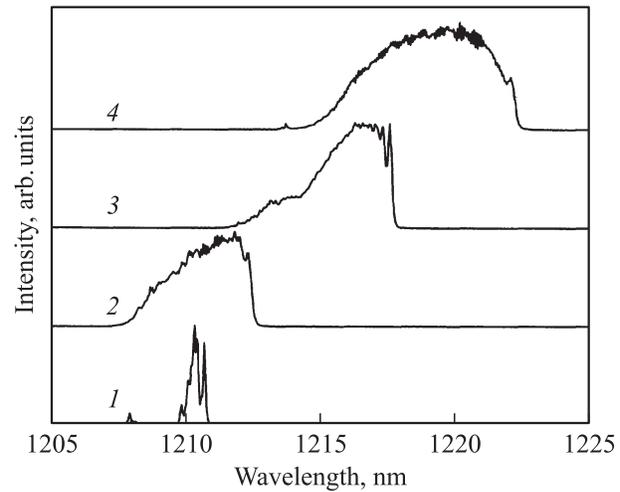
**Рис. 5.** Зависимость пороговой плотности тока  $J_{th}$  от обратной длины резонатора  $1/L$  лазерного диода с длиной волны излучения 1220 нм.



**Рис. 6.** Зависимость обратной дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора Фабри-Перо  $L$  лазерного диода с длиной волны излучения 1220 нм.



**Рис. 7.** Ватт-амперная характеристика лазерного диода с естественными сколами в качестве зеркал с апертурой  $W = 100$  мкм и длиной резонатора  $L = 2400$  мкм, излучающего на длине волны 1220 нм в непрерывном режиме (CW).



**Рис. 8.** Зависимость спектра излучения от тока накачки мезаполоскового лазера. Ток накачки, А: 1 — 0.5, 2 — 2, 3 — 4, 4 — 6.

ванного излучения, которое составило  $\eta_i = 94\%$ . Из этой же зависимости было определено значение внутренних оптических потерь, которое составило  $\alpha_i = 2.5 \text{ cm}^{-1}$ .

На рис. 7 приведена ватт-амперная характеристика лазерного диода с зеркалами, представляющими собой естественные сколы, с апертурой  $W = 100$  мкм и длиной резонатора  $L = 2400$  мкм. Максимальная мощность в непрерывном режиме генерации составила 2 Вт на зеркало. На начальном участке ватт-амперной характеристики дифференциальная квантовая эффективность составила 0.37 Вт/А.

На рис. 8 показаны спектры лазерной генерации в зависимости от тока накачки. При токе 6 А максимум спектра достигал длины волны 1220 нм. При этом ширина на половине интенсивности максимумов спектра составляла 6 нм.

Были проведены исследования углов расходимости излучения в дальней зоне в плоскостях, параллельной ( $\theta_{\parallel}$ ) и перпендикулярной ( $\theta_{\perp}$ ) эпитаксиальным слоям. Измерения проводились в непрерывном режиме при комнатной температуре и рабочей мощности 1 Вт на зеркало. Значения углов  $\theta_{\parallel}$  и  $\theta_{\perp}$ , измеренные на полувысоте от максимальной интенсивности, составили  $9^\circ$  и  $34^\circ$  соответственно.

## 5. Заключение

Проведены фотолюминесцентные исследования гетероструктур с составной активной областью, состоящей из сильнонапряженной квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  и компенсирующих барьеров  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  (содержание фосфора  $y$  менялось в диапазоне от 0 до 0.2). Показано, что увеличение в компенсирующем слое содержания фосфора  $P$  позволяет выращивать квантовые ямы  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  большей толщины.

На основании фотолуминесцентных исследований выбраны параметры составной квантовой ямы, позволяющие получить максимальную длину волны излучения. Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs выращены асимметричные лазерные гетероструктуры GaInAs/GaAs/AlGaAs с компенсирующими слоями GaAsP вблизи квантовой ямы GaInAs. Из гетероструктуры изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой  $W = 100$  мкм, излучающие на длине волны 1220 нм. Исследованы излучательные характеристики таких лазеров. Полученные лазеры имели внутренние оптические потери, равные  $2.5 \text{ см}^{-1}$ , и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 2 Вт на зеркало.

Работа выполнена при поддержке Программы Федерального агентства по образованию „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы 1.2.2 „Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук“ (ГК № 2508 от 20.11.2009 г.).

## Список литературы

- [1] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Г.В. Скрынников, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, Н.В. Фетисова. ФТП, **34** (12), 1457 (2000).
- [2] С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, Е.Г. Голикова, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29** (3), 65 (2003).
- [3] А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.В. Лютецкий, Л.С. Вавилова, В.В. Васильева, А.А. Мармалюк, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **34** (13), 25 (2008).
- [4] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, З.Р. Соколова, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, **43** (10), 1374 (2009).
- [5] Д.А. Винокуров, В.В. Васильева, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (2), 246 (2010).
- [6] Д.А. Винокуров, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, М.Г. Растегаева, А.В. Рожков, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (12), 1640 (2010).
- [7] Д.А. Винокуров, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, А.Д. Бондарев, Н.А. Рудова, И.С. Тарасов. ФТП, **45** (9), 1274 (2011).
- [8] В.В. Шамахов, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.А. Капитонов, С.А. Зорина, Д.Н. Николаев, А.В. Мурашова, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **31** (23), 1 (2005).
- [9] Е.Г. Голикова, В.А. Горбылев, Ю.В. Ильин, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, В.А. Симаков, И.С. Тарасов, Е.А. Третьякова, Н.В. Фетисова. Письма ЖТФ, **26** (6), 57 (2000).
- [10] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, Е.Г. Голикова, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов. ФТП, **36** (11), 1393 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

## Diode lasers emitting at 1220 nm wavelength with highly strained GaInAs quantum well and compensating GaAsP layers MOCVD-grown on GaAs substrate

*D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhitin, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov, A.D. Bondarev, L.S. Vavilova, I.S. Tarasov*

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

**Abstract** Photoluminescence investigations of heterostructures with active region composed of a  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  quantum well inserted between  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  compensating layers have been carried out. It has been shown, that an unrelaxed heterostructure with  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  quantum well of larger thickness could be reached by means of  $P$  content increase in compensating layers. Parameters of a composed active region have been chosen on the base of photoluminescence investigations for reaching the longest lasing wavelength. Laser heterostructures with composed active region consisting of highly strained  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}$  quantum well inserted between  $\text{GaAs}_{0.85}\text{P}_{0.15}$  compensating layers have been grown on GaAs substrates by MOCVD epitaxy. Mesa stripe diode lasers with  $100 \mu\text{m}$  aperture emitting at 1220 nm wavelength have been manufactured. Maximum output power in continuous wave regime has been reached equal to 2W per facet for such diode lasers. Use of GaAsP compensated barriers has allowed to obtain an unrelaxed GaInAs quantum well resulting in absence of maximum output power values dispersion for diode laser samples obtained from the same wafer.