

# InGaAs/GaAs/AlGaAs-лазеры, излучающие на длине волны 1190 нм, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs

© Д.А. Винокуров<sup>¶</sup>, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, М.Г. Растегаева, А.В. Рожков, И.С. Тарасов

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

(Получена 29 апреля 2010 г. Принята к печати 7 мая 2010 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs выращены лазерные гетероструктуры InGaAs/GaAs/AlGaAs. Изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой 100 мкм, излучающие на длине волны 1190 нм. Показано, что в данных лазерах активная область является релаксированной, что проявляется в разбросе достигаемой максимальной мощности для различных лазеров, полученных из одной гетероструктуры. Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме генерации для таких лазеров составила 5.5 Вт на зеркало.

## 1. Введение

На сегодняшний день сильный интерес проявляется к лазерам, излучающим в диапазоне длин волн 1150–1300 нм. Гетеролазеры, излучающие в данном спектральном диапазоне, используются в волоконной оптике, оптических усилителях и при накачке волоконных лазеров, легированных висмутом. В настоящее время для получения лазеров на данные длины волн в основном используются системы твердых растворов GaInAsP [1] и AlGaInAs [2,3], выращенные на подложках InP. В последнее время интенсивно развивается альтернативное направление по созданию таких лазеров на основе гетероструктур, выращенных на подложках GaAs. Это обусловлено тем, что использование для лазеров гетероструктур, выращенных на подложке GaAs, позволит увеличить температурную стабильность характеристик из-за более сильной локализации носителей заряда в активной области, а также обеспечит рост оптического ограничения из-за большого скачка показателя преломления на гетерогранице волновод–эмиттер. Однако достижение длинноволновой генерации структур, выращенных на подложках GaAs, ограничено процессом образования дислокаций вследствие больших напряжений, возникающих из-за значительного рассогласования параметров кристаллических решеток между подложкой и слоем активной области.

Для решения этой проблемы и получения лазеров с данной длиной волны на подложке GaAs применяют ряд подходов:

- применение в качестве активной области In(Ga)As квантовых точек [4–6];
- использование квантовой ямы на основе четверного твердого раствора InGaAsN [7,8];
- использование в лазерной структуре компенсирующих слоев GaAsP для подавления процессов образования дислокаций [9];
- подбор технологических режимов эпитаксии напряженного слоя InGaAs активной области, что позво-

ляет выращивать бездислокационные слои с большими значениями состава и толщины твердого раствора [10].

В данной работе нами были исследованы оптические характеристики лазеров с длиной волны излучения 1190 нм на основе гетероструктур с сильно напряженной квантовой ямой InGaAs, выращенных на подложке GaAs(100) методом МОС-гидридной эпитаксии при выборе оптимальных технологических параметров.

## 2. Экспериментальные образцы

Все исследуемые структуры выращивались в идентичных условиях методом МОС-гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS 3100 в вертикальном реакторе с резистивным нагревом подложкодержателя. Давление в реакторе — 77 Торр, скорость вращения подложкодержателя — 1000 об/мин. В качестве источников служили триметилгаллий Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, триметилалюминий Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, триметилиндий In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и арсин (AsH<sub>3</sub>). В качестве легирующей примеси *p*- и *n*-типа проводимости использовались моносилан (SiH<sub>4</sub>) и бисциклодиенил магния Mg(C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub> соответственно.

При выращивании гетероструктур стояла задача подобрать технологические режимы таким образом, чтобы обеспечить максимальную длину волны излучения лазера.

В статье [11] было показано, что интенсивность излучения в гетероструктурах с напряженной квантовой ямой в области больших составов твердого раствора In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x > 0.35$ ) имеет сильную зависимость от толщины квантовой ямы. При этом длина волны излучения в области максимума интенсивности не превышает 1130–1140 нм. Для продвижения в длинноволновую область необходимо увеличивать в слое InGaAs долю In, что приводит к увеличению напряжений и уменьшению критической толщины квантовой ямы. При превышении критической толщины происходит ухудшение оптических свойств материала за счет образования дефектов вплоть до отсутствия регистрируемого излучения. Однако при понижении температуры эпитаксии

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

## Описание лазерной гетероструктуры

№	Слой	Состав	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина, мкм
1	<i>n</i> -подложка	GaAs (100)	$2 \cdot 10^{18}$	350
2	<i>n</i> -буфер	GaAs:Si	$2 \cdot 10^{18}$	0.5
3	<i>n</i> -эмиттер	Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As:Si	$8 \cdot 10^{17}$	2.0
4	Волновод	GaAs	Не легирован	1.05
5	Активная область (КЯ)	In <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As	Не легирован	80 Å
6	Волновод	GaAs	Не легирован	0.75
7	<i>p</i> -эмиттер	Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As:Mg	$2 \cdot 10^{18}$	1.5
8	Контактный <i>p</i> -слой	GaAs:Mg	$2 \cdot 10^{19}$	0.3

до 600°C и допущении снижения квантового выхода до 30% от максимума нам удалось получить квантовую яму In<sub>*x*</sub>Ga<sub>1-*x*</sub>As с составом *x* = 0.4 и толщиной 80 Å, которая имела максимум в спектре фотолюминесценции 1170 нм. Дальнейшее уменьшение температуры роста приводило к резкому ухудшению морфологии материала активной области. Свидетельством частичной релаксации активной области, по нашему мнению, является наблюдаемая нами достаточно сильная неоднородность интенсивности максимума спектра фотолюминесценции при сканировании по поверхности фотолюминесцентной гетероструктуры. На основе полученных данных была выращена исследуемая лазерная гетероструктура.

На подложке *n*-GaAs (100) были выращены асимметричные лазерные гетероструктуры, состоящие из легированных эмиттерных слоев Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As (в качестве донорной и акцепторной примесей использовались кремний и магний соответственно), нелегированных волноводов GaAs и сильно сжато-напряженной активной области InGaAs. Подробное описание лазерной гетероструктуры дано в таблице. Температура эпитаксии для эмиттеров составляла 750°C, для волноводов и активной области 600°C. Температура роста эмиттерных слоев 750°C была выбрана исходя из того, чтобы обеспечить достаточный уровень легирования твердого раствора Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As.

Далее с использованием известных построенных технологий [12,13] из выращенной структуры были изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой излучения *W* = 100 мкм. Образцы лазерных диодов изготавливались с различной длиной резонатора *L* = 2000–4000 мкм и исследовались их пороговые, мощностные и спектральные характеристики.

### 3. Экспериментальные результаты

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

На рис. 1 приведена зависимость пороговой плотности тока  $J_{th}$  от обратной длины резонатора  $1/L$  лазерного диода. Из данной зависимости было определено минимальное значение пороговой плотности тока при длине резонатора, устремляющейся к бесконечности, которое соответствует нулевым потерям на выход из резонатора

Фабри–Перо. Данное значение составило 45 А/см<sup>2</sup>, что является соизмеримым с нашими рекордными по мощности лазерами на 1080 нм (60 А/см<sup>2</sup>) [14].

Также нами исследовалась зависимость обратной дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора Фабри–Перо *L* (рис. 2). Из зависимости, при-

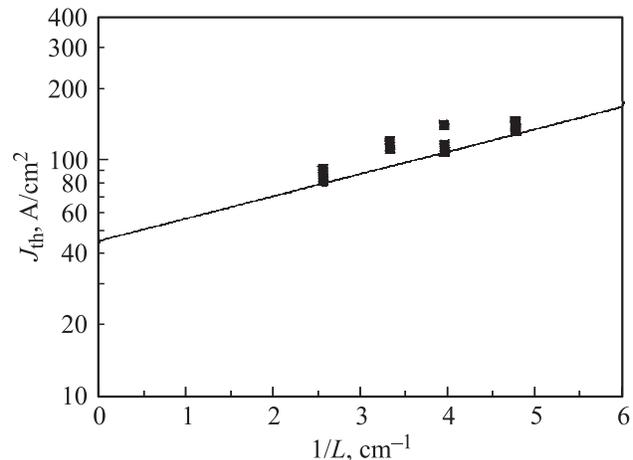


Рис. 1. Зависимость пороговой плотности тока  $J_{th}$  от обратной длины резонатора  $1/L$  лазерного диода с длиной волны излучения 1190 нм.

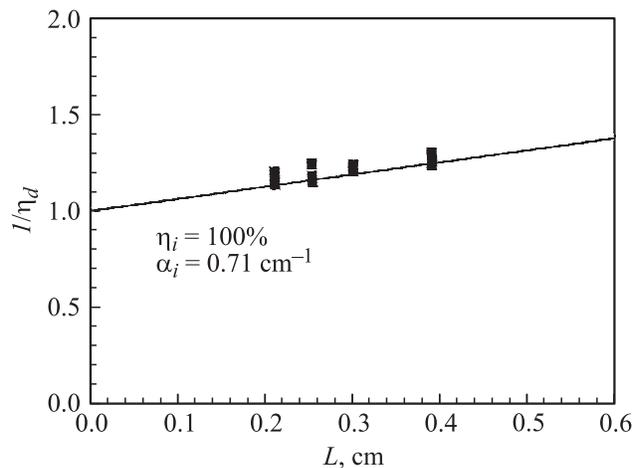
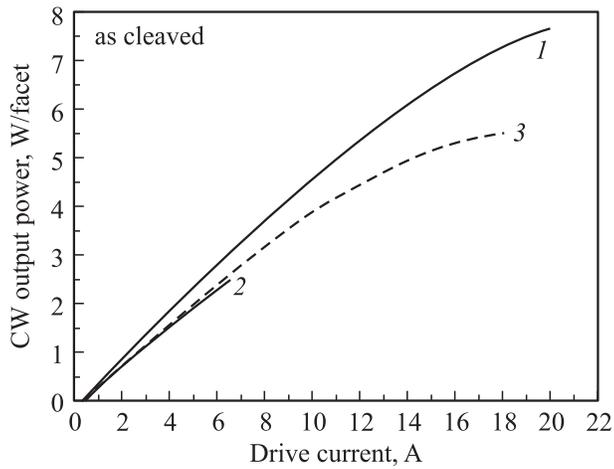


Рис. 2. Зависимость обратной дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора Фабри–Перо *L* лазерного диода с длиной волны излучения 1190 нм.



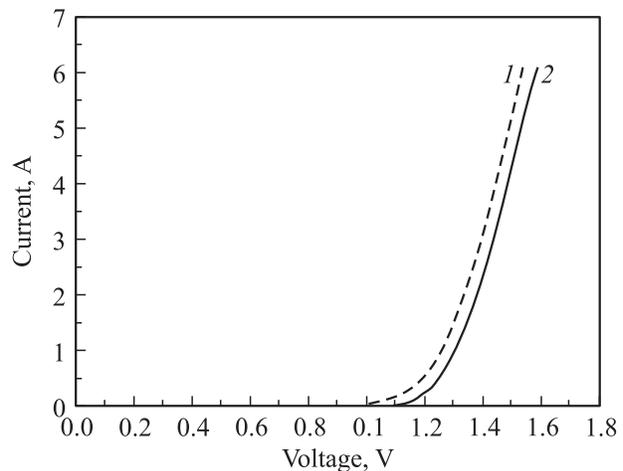
**Рис. 3.** Ватт-амперные характеристики лазерных диодов с естественно сколотыми зеркалами с апертурой  $W = 100$  мкм:  $1$  — лазерный диод с длиной волны излучения 1080 нм;  $2, 3$  — лазерные диоды с длиной волны излучения 1190 нм.

веденной на рис. 2, при бесконечно малой длине резонатора определялось значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения ( $\eta_i$ ), которое составило 100%. Такое значение  $\eta_i$  указывает на отсутствие токовых утечек за порогом генерации. Значение внутренних оптических потерь  $\alpha_i$  составило  $0.71 \text{ см}^{-1}$ . Такое достаточно низкое значение внутренних оптических потерь позволило исследовать полупроводниковые лазеры с длиной резонатора 2000–4000 мкм без заметного снижения дифференциальной квантовой эффективности.

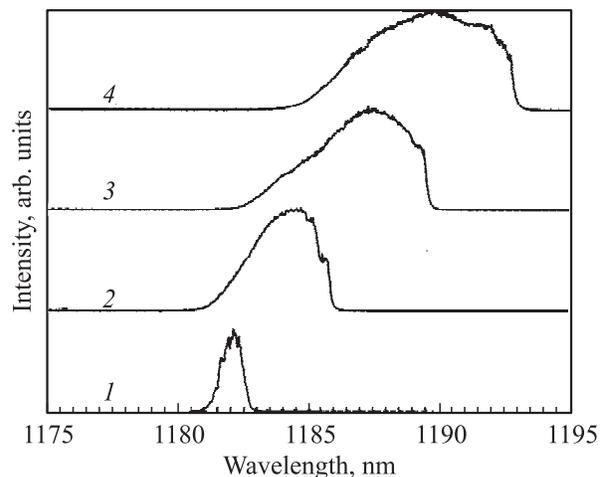
На рис. 3 приведены ватт-амперные характеристики лазерных диодов с естественно-сколотыми зеркалами с апертурой  $W = 100$  мкм. Нами приведены ватт-амперные характеристики для двух лазерных диодов с длиной волны излучения 1190 нм (максимальные мощности 2.5 Вт (кривая 2) и 5.5 Вт (кривая 3)) и, для сравнения, для лазерного диода с длиной волны излучения 1080 нм с максимально достигнутой мощностью 7.5 Вт (кривая 1). Для лазера с длиной волны излучения 1190 нм глубина квантовой ямы для носителей заряда относительно волновода должна быть больше, чем для лазера с длиной волны излучения 1080 нм. Отсюда следовало бы ожидать, что лазер, излучающий на длине волны 1190 нм, должен иметь более высокое значение максимальной достигнутой мощности по сравнению с 1080 нм лазером. Из зависимости же мы видим, что более высокое значение максимальной мощности достигнуто в лазерах для 1080 нм (кривая 1). Это связано, по нашему мнению, с тем, что квантовая яма в лазере на 1190 нм из-за толщины, превышающей критическое значение, является частично релаксированной. Превышение критической толщины ведет к образованию дислокаций. Данное предположение подтверждается также тем, что в таких лазерах наблюдается сильный разброс в максимально достигаемой мощности вплоть до отсутствия генерации,

что видно из кривых 2 и 3. Из кривых 2 и 3 мы видим, что максимальная мощность может колебаться от 2.5 до 5.5 Вт, что подтверждается неоднородностью интенсивности максимума спектра излучения в аналогичной изотипной фотолюминесцентной гетероструктуре с длиной волны излучения 1170 нм.

На рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики лазерных диодов (кривая 1 — лазер, в котором отсутствует генерация; кривая 2 — лазер, в котором генерация наблюдается). Из зависимостей видно, что напряжение отсечки в лазере с отсутствием генерации имеет меньшее значение, чем для лазера, в котором она есть. Напряжение отсечки соответствует наименьшему значению энергии кванта в квантовой яме, т.е. энергии излучательной рекомбинации между электроном и дыркой. Меньшее значение напряжения отсечки для лазера с отсутствием генерации связано, по нашему мнению, с тем, что в них имеется достаточное количество



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики лазерных диодов с длиной волны излучения 1190 нм:  $1$  — лазер, в котором генерация не наблюдается;  $2$  — лазер, в котором генерация наблюдается.



**Рис. 5.** Зависимость спектра излучения от тока накачки мезаполоскового лазера, А:  $1$  — 0.5,  $2$  — 2.5,  $3$  — 5,  $4$  — 7.

дислокаций, которые создают в квантовой яме более низкоэнергетические уровни.

На рис. 5 представлены спектры лазерной генерации в зависимости от тока накачки. При токе 7 А максимум спектра достигал длины волны 1190 нм. При этом уширение спектра составило 5 нм.

#### 4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs были выращены асимметричные с широким волноводом лазерные гетероструктуры InGaAs/GaAs/AlGaAs. Технологические режимы были подобраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную длину волны излучения лазерного диода. Из лазерных гетероструктур были изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой 100 мкм, излучающие на длине волны 1190 нм, и исследованы их излучательные характеристики.

Полученные лазерные диоды имели внутренние оптические потери, равные  $0.71 \text{ см}^{-1}$ , и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 5.5 Вт на одно зеркало. Показано, что данные лазеры имеют активную область, которая является релаксированной. Это подтверждается разбросом в максимальной мощности (2.5–5.5 Вт на зеркало) вплоть до отсутствия генерации для лазеров, полученных из одной структуры. Также это подтверждается фотолюминесцентными исследованиями структур, аналогичных лазерным гетероструктурам, в которых наблюдается достаточно сильная неоднородность в интенсивности спектров фотолюминесценции при сканировании по поверхности.

Стабилизация мощностных характеристик таких лазеров и продвижение в длинноволновую область в дальнейшем, по нашему мнению, возможна при внесении изменений в дизайн лазерной гетероструктуры. Одним из способов такого изменения может быть использование компенсирующих слоев на границе квантовой ямы.

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“: „Разработка и создание полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур с квантовыми ямами на подложках GaAs, излучающих в диапазоне длин волн 1200–1600 нм“ (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. ПЖТФ, **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. ПЖТФ, **34** (13), 25 (2008).
- [4] F. Heinrichsdorff, M.-H. Mao, N. Kirstaedter, A. Krost, D. Bimberg, A.O. Kosogov, P. Werner. Appl. Phys. Lett., **71** (1), 22 (1997).
- [5] С.С. Михрин, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, В.М. Устинов, М.М. Кулагина, Е.В. Никитина, И.П. Сошников, Ю.М. Шерняков, Д.А. Лившиц, Н.В. Крыжановская, Д.С. Сизов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, D. Bimberg, Ж.И. Алфёров. ФТП, **36** (11), 1400 (2002).
- [6] С.С. Михрин, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.А. Малеев, В.М. Устинов, Ю.М. Шерняков, И.Н. Каяндер, Е.Ю. Кондратьева, Д.А. Лившиц, И.С. Тарасов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, Д. Бимберг, Ж.И. Алфёров. ФТП, **34** (1), 117 (2000).
- [7] D.A. Livshits, A.Y. Egorov, H. Riechert. Electron. Lett., **36** (16), 1381 (2000).
- [8] M. Kondow, T. Kitatani, S. Nakatsuka, M.C. Larson, K. Nakahara, Y. Yazawa, M. Okai, K. Uomi. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **3** (3), 719 (1997).
- [9] N. Tansu, J.-Y. Yeh, L.J. Mawst. Appl. Phys. Lett., **82** (23), 4038 (2003).
- [10] T.K. Sharma, M. Zorn, U. Zeimer, H. Kissel, F. Bugge, M. Weyers. Cryst. Res. Technol., **40** (9), 877 (2005).
- [11] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, **43** (10), 1374 (2009).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, 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** (3), 388 (2005).

*Редактор Л.В. Беляков*

## **InGaAs/GaAs/AlGaAs diode lasers emitting at 1190 nm wavelength grown on GaAs substrate by MOCVD epitaxy**

*D.A. Vinokurov, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhin, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov, M.G. Rastegaeva, A.V. Rozhkov, I.S. Tarasov*

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

**Abstract** InGaAs/GaAs/AlGaAs laser heterostructures have been grown on GaAs substrates by MOCVD epitaxy method. Mesastripe diode lasers with  $100\ \mu\text{m}$  aperture emitting at 1190 nm wavelength have been manufactured. It is shown, that in such lasers active region is decompressed resulting in variation of obtained maximum output power in different diode laser samples fabricated from the same wafer. Maximum output power in continuous wave regime is 5.5 W per facet for such diode lasers.