

# Лазеры с сильно напряженной квантовой ямой GaInAs с компенсирующими слоями GaAsP, 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, А.Д. Бондарев, Н.А. Рудова, И.С. Тарасов

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

(Получена 15 февраля 2011 г. Принята к печати 21 февраля 2011 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs выращены лазерные гетероструктуры с активной областью, состоящей из сильно напряженной квантовой ямы GaInAs, помещенной между компенсирующими слоями GaAsP. Изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой 100 мкм, излучающие на длине волны 1190 нм. Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме генерации для лазерных диодов составила 4.5 Вт на зеркало. Использование компенсирующих барьеров GaAsP позволило получить нерелаксированную квантовую яму GaInAs, что проявилось в отсутствии разброса максимальной мощности излучения для лазерных диодов, полученных из одной лазерной гетероструктуры.

## 1. Введение

В настоящее время повышенный интерес проявляется к лазерам, излучающим 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. На сегодняшний день для получения таких лазеров в основном используются гетероструктуры, выращенные на подложках InP [1–3]. Альтернативой таким лазерам могут быть лазеры на основе гетероструктур, выращенных на подложках GaAs. Интерес к лазерам на основе гетероструктур, выращенных на подложках GaAs, обусловлен тем, что они будут обладать более высокой температурной стабильностью характеристик из-за более сильной локализации носителей заряда в активной области по сравнению с лазерами на основе гетероструктур, выращенных на подложках InP. Однако достижение длинноволновой генерации в лазерах на основе гетероструктур на подложках GaAs ограничено процессом образования дислокаций из-за сильных напряжений, которые обусловлены значительным рассогласованием параметров кристаллических решеток подложки и слоя активной области. Ранее нами в работе [4] было показано, что при подборе технологических режимов роста можно получить лазеры на основе гетероструктур с сильно напряженной квантовой ямой GaInAs, выращенных на подложке GaAs, излучающие на длине волны 1190 нм. Дальнейшее продвижение в длинноволновую область за счет как увеличения содержания индия в слое GaInAs, так и увеличения толщины активной области было невозможно из-за образования дефектов вследствие превышения критической толщины. При этом уже в лазерах

с длиной волны излучения 1190 нм, полученных из одной гетероструктуры, наблюдался сильный разброс по максимальной выходной мощности, которая находилась в диапазоне 2.5–5.5 Вт на зеркало. Такой разброс, по нашему мнению, говорит о том, что в гетероструктуре, из которой изготавливались лазеры, произошла частичная релаксация упругих напряжений за счет образования дефектов. Одним из способов подавления релаксации упругих напряжений является использование компенсирующих слоев. Для сжато-напряженного слоя активной области GaInAs в качестве компенсирующего барьера можно использовать растянуто-напряженный слой GaAsP.

В данной работе были исследованы оптические характеристики лазеров с длиной волны излучения 1190 нм на основе гетероструктур с сильно напряженной квантовой ямой GaInAs с компенсирующими слоями GaAsP, выращенных на подложках GaAs(100) методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений).

## 2. Экспериментальные образцы

Исследуемые структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS 3100 с реактором вертикального типа 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 бисциклопентодиенил магния ( $\text{Mg}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ) соответственно.

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

## Описание лазерной гетероструктуры

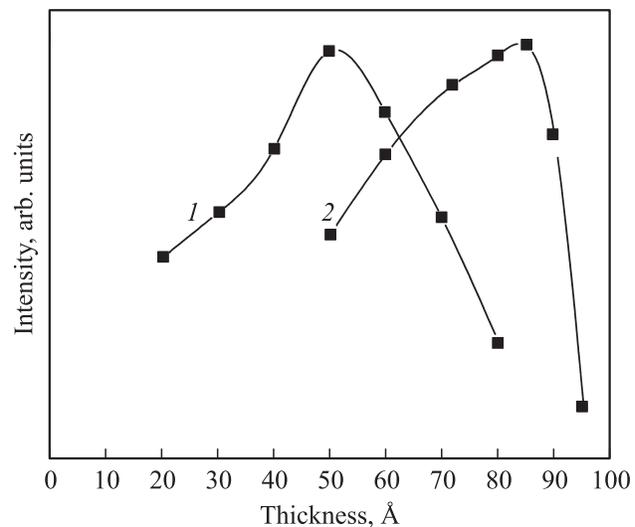
№	Слой	Состав	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина
1	<i>n</i> -подложка	GaAs(100)	$2 \cdot 10^{18}$	350 мкм
2	<i>n</i> -буфер	GaAs:Si	$2 \cdot 10^{18}$	0.5 мкм
3	<i>n</i> -эмиттер	Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As:Si	$8 \cdot 10^{17}$	2.0 мкм
4	волновод	GaAs	Не легирован	1.05 мкм
5	компенсирующий слой	GaAs <sub>0.9</sub> P <sub>0.1</sub>	» »	150 Å
6	разделительный слой	GaAs	» »	20 Å
7	активная область (КЯ)	Ga <sub>0.6</sub> In <sub>0.4</sub> As	» »	85 Å
8	разделительный слой	GaAs	» »	20 Å
9	компенсирующий слой	GaAs <sub>0.9</sub> P <sub>0.1</sub>	» »	150 Å
10	волновод	GaAs	» »	0.75 мкм
11	<i>p</i> -эмиттер	Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As:Mg	$2 \cdot 10^{18}$	1.5 мкм
12	контактный <i>p</i> -слой	GaAs:Mg	$2 \cdot 10^{19}$	0.3 мкм

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. Квантовая яма GaInAs, волноводные (GaAs) и эмиттерные (AlGaAs) слои были аналогичны по составу и толщине слоям структуры из работы [4]. Отличие заключалось в том, что на границах с квантовой ямой нами вводились компенсирующие слои из GaAsP. Между компенсирующим слоем GaAsP и квантовой ямой GaInAs были введены слои GaAs толщиной 20 Å. Слои GaAs вводились с целью обеспечить резкость гетерограниц. Параметры активной области, представляющей собой квантовую яму с компенсирующими барьерами GaAsP, выбирались исходя из фотолюминесцентных исследований. Для фотолюминесцентных исследований использовалась нелегированная гетероструктура с активной областью, заключенной в волноводные слои GaAs толщиной по 0.5 мкм, которые были ограничены широкозонными слоями Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As толщиной 0.3 мкм. Активная область представляла собой квантовую яму Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>As, помещенную между компенсирующими слоями GaAs<sub>0.9</sub>P<sub>0.1</sub> толщиной по 150 Å. Квантовая яма и компенсирующие слои были разделены слоями GaAs толщиной 20 Å.

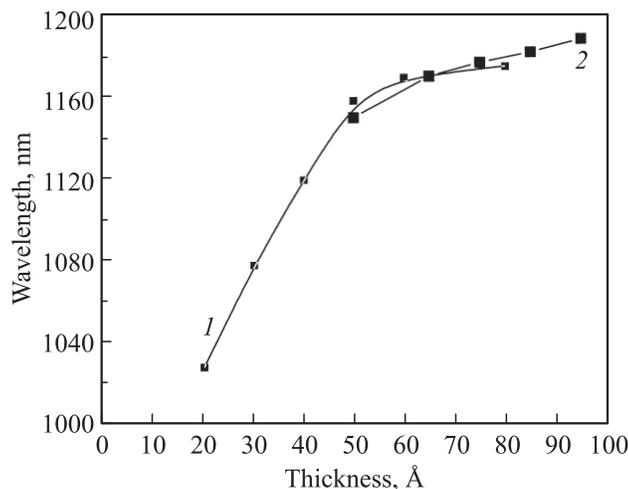
На рис. 1 приведены зависимости интенсивности максимума спектра фотолюминесценции от толщины квантовой ямы без компенсирующих барьеров (кривая 1) и помещенной между компенсирующими барьерами GaAs<sub>0.9</sub>P<sub>0.1</sub> толщиной по 150 Å (кривая 2). Из зависимостей видно, что использование компенсирующих барьеров приводит к увеличению интенсивности при толщинах квантовой ямы > 65 Å. При толщине квантовой ямы 80 Å интенсивность максимума спектра фотолюминесценции от структуры с компенсирующими барьерами в 4 раза выше по сравнению со структурой без таких барьеров. Квантовая яма такой толщины без компенсирующих барьеров использовалась нами для лазеров, описанных в работе [4]. При этом максимум

интенсивности фотолюминесценции структуры с квантовой ямой с компенсирующими барьерами приходится на толщину квантовой ямы 85 Å.

На рис. 2 приведены зависимости длины волны максимума спектра фотолюминесценции от толщины квантовой ямы без компенсирующих барьеров (кривая 1) и помещенной между компенсирующими барьерами GaAs<sub>0.9</sub>P<sub>0.1</sub> толщиной по 150 Å (кривая 2). Из зависимостей видно, что они практически совпадают, т.е. наличие компенсирующих барьеров не влияет на длину волны фотолюминесценции квантовой ямы. Также из зависимости 2 видно, что разница в длинах волны для квантовых ям толщиной 80 и 85 Å практически отсутствует. Поэтому для лазерных структур с компенсирующими барьерами мы взяли активную область 85 Å,



**Рис. 1.** Зависимости интенсивности максимума спектра фотолюминесценции гетероструктуры от толщины квантовой ямы Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>As: 1 — квантовая яма Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>As без компенсирующих слоев; 2 — квантовая яма Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>As, помещенная между компенсирующими слоями GaAs<sub>0.9</sub>P<sub>0.1</sub> толщиной по 150 Å.



**Рис. 2.** Зависимости длины волны максимума спектра фотолюминесценции гетероструктуры от толщины квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}$ : 1 — квантовая яма  $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}$  без компенсирующих слоев; 2 — квантовая яма  $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}$ , помещенная между компенсирующими слоями  $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$  толщиной по  $150 \text{ \AA}$ .

так как на нее приходится максимум интенсивности спектра фотолюминесценции.

Для активной области, состоящей из квантовой ямы  $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{As}$  ( $85 \text{ \AA}$ ), помещенной между компенсирующими слоями  $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$  (2 слоя по  $150 \text{ \AA}$ ), которые отделены от квантовой ямы слоями  $\text{GaAs}$  (2 слоя по  $20 \text{ \AA}$ ), мы провели расчет критической толщины согласно [5]. Расчетное значение критической толщины составной активной области при температуре эпитаксии  $600^\circ\text{C}$  составляет  $435 \text{ \AA}$ , что больше толщины активной области в реальной структуре ( $425 \text{ \AA}$ ).

В таблице приведено описание лазерной гетероструктуры с компенсирующими слоями.

Из выращенных лазерных гетероструктур с использованием стандартных постростовых технологий [6,7] были изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой излучения  $W = 100 \text{ мкм}$  и различными длинами резонатора  $L = 2000\text{--}4000 \text{ мкм}$ .

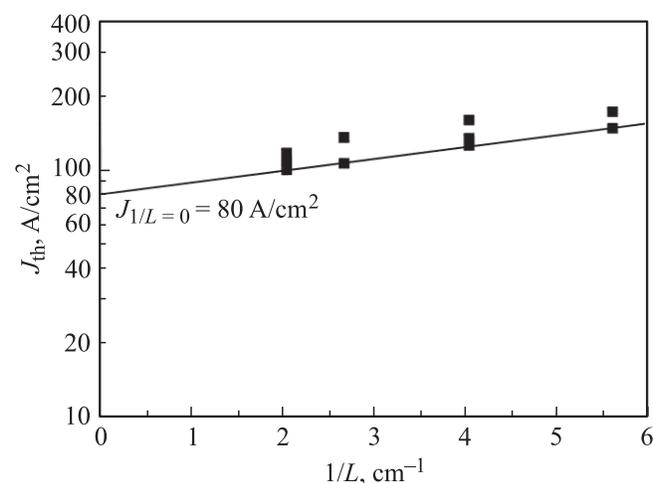
### 3. Экспериментальные результаты

Исследования проводились в непрерывном режиме генерации (CW) при фиксированной температуре тепловода  $25^\circ\text{C}$ .

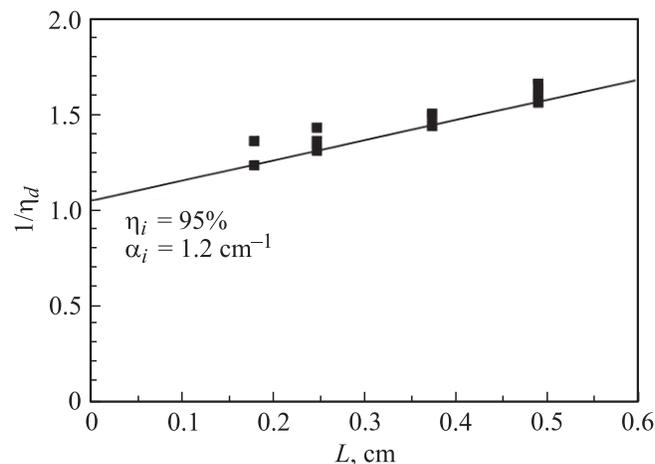
На рис. 3 приведена зависимость пороговой плотности тока  $J_{\text{th}}$  от обратной длины резонатора  $1/L$  лазерного диода. Из данной зависимости при длине резонатора, стремящейся к бесконечности, определялось минимальное значение пороговой плотности тока  $J_{1/L=0}$ , соответствующее нулевым потерям на выход из резонатора Фабри–Перо. Это значение составило  $80 \text{ А/см}^2$ , что выше значения для лазеров на  $1190 \text{ нм}$  без компенсирующих барьеров ( $45 \text{ А/см}^2$ ) из [4]. Это связано, по нашему

мнению, с тем, что компенсирующие слои создают энергетический барьер для протекания носителей заряда в квантовую яму. Кроме того, на границе компенсирующий барьер–квантовая яма могут образовываться центры безызлучательной рекомбинации.

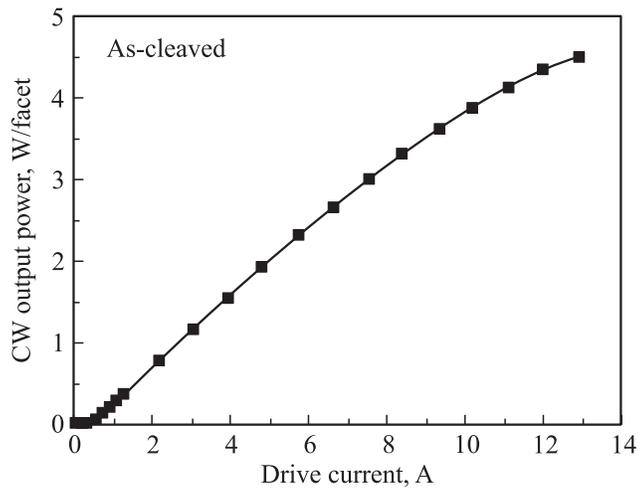
Исследовалась зависимость обратной дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора Фабри–Перо  $L$  (рис. 4). Из зависимости при бесконечно малой длине резонатора определялось значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения  $\eta_i$ , которое составило  $95\%$ . Из наклона зависимости было определено значение внутренних оптических потерь:  $\alpha_i = 1.2 \text{ см}^{-1}$ . Более высокое значение оптических потерь по сравнению с лазерами без компенсирующих слоев ( $0.71 \text{ см}^{-1}$ ) из [4] определяется, по нашему мнению, теми же причинами, что и более высокое минимальное значение плотности порогового тока.



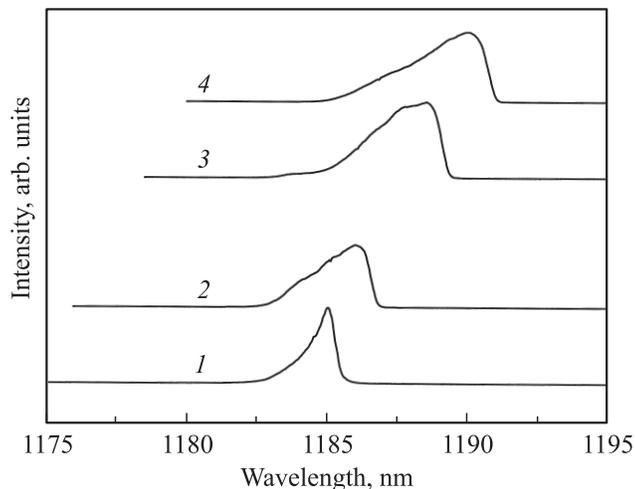
**Рис. 3.** Зависимость пороговой плотности тока  $J_{\text{th}}$  от обратной длины резонатора  $1/L$  лазерного диода с длиной волны излучения  $1190 \text{ нм}$ .



**Рис. 4.** Зависимость обратной дифференциальной эффективности  $1/\eta_d$  от длины резонатора Фабри–Перо  $L$  лазерного диода с длиной волны излучения  $1190 \text{ нм}$ .



**Рис. 5.** Ватт-амперная характеристика лазерного диода с зеркалами в виде естественных сколов с апертурой  $W = 100$  мкм, излучающего на длине волны 1190 нм.



**Рис. 6.** Зависимость спектра излучения от тока накачки мезаполоскового лазера. Ток накачки, А: 1 — 0.5, 2 — 2, 3 — 4, 4 — 5.

На рис. 5 приведена типичная ватт-амперная характеристика лазерного диода с зеркалами в виде естественных сколов с апертурой  $W = 100$  мкм. Максимально достигнутая выходная мощность составила 4.5 Вт на зеркало. Следует отметить, что в отличие от лазеров без компенсирующих слоев [4], которые имели разброс по мощности для разных лазеров, полученных из одной структуры (2.5–5.5 Вт на зеркало), лазеры с компенсирующими слоями не имели разброса по мощности. Это говорит о том, что введение компенсирующих слоев позволило подавить процесс релаксации упругих напряжений и избежать образования дефектов.

На рис. 6 показаны спектры лазерной генерации в зависимости от тока накачки. При токе 5 А максимум спектра достигал длины волны 1190 нм. При этом ширина спектра на половине высоты максимума интенсивности составляла 4 нм.

## 4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs были выращены асимметричные лазерные гетероструктуры GaInAs/GaAs/AlGaAs с компенсирующими слоями GaAsP вблизи квантовой ямы GaInAs. Из гетероструктуры были изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой  $W = 100$  мкм, излучающие на длине волны 1190 нм. Исследованы излучательные характеристики таких лазеров.

Полученные лазеры имели внутренние оптические потери, равные  $1.2 \text{ см}^{-1}$ , и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 4.5 Вт на зеркало. За счет использования компенсирующих слоев вблизи квантовой ямы удалось добиться стабилизации мощностных характеристик, т. е. отсутствия разброса по мощности для лазеров, полученных из одной лазерной гетероструктуры.

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. 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, 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).
- [5] 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).
- [6] 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 в ЖТФ, **26** (6), 57 (2000).
- [7] 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 1190 nm wavelength with a highly strained GaInAs quantum well and GaAsP compensated layers MOCVD-grown on a GaAs substrate

*D.A. Vinokurov, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhin, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov, A.D. Bondarev, N.A. Rudova, I.S. Tarasov*

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

**Abstract** Laser heterostructures with active region consisting of a highly strained GaInAs quantum well inserted between GaAsP compensated layers have been grown on GaAs substrates by MOCVD epitaxy. Mesastripe diode lasers with  $100\ \mu\text{m}$  aperture emitting at 1190 nm wavelength have been manufactured. 4.5 W maximum output power per facet in continuous wave regime has been reached for such diode lasers. Use of GaAsP compensated barriers has allowed obtaining an unrelaxed GaInAs quantum well resulting in absence of maximum output power values dispersion for the diode laser samples obtained from the same wafer.