

## Линейки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaAsP/GaAs, излучающие на длине волны 850 нм

© В.В. Шамахов<sup>¶</sup>, Д.Н. Николаев, А.В. Лютецкий, К.В. Бахвалов, И.С. Шашкин, М.Г. Растегаева, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов

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

(Получена 17 июня 2013 г. Принята к печати 24 июня 2013 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены 2 типа лазерных гетероструктур — без компенсации внутренних напряжений, с эмиттерными и волноводными слоями из твердого раствора AlGaAs (тип 1), и лазерные гетероструктуры с компенсацией напряжений, с эмиттерными и волноводными слоями AlGaAsP (тип 2). Изготовлены линейки лазерных диодов шириной 5 мм и коэффициентом заполнения 24%, излучающие на длине волны 850 нм. Исследованы их мощностные характеристики в непрерывном и импульсном режимах генерации. Показано, что линейки лазерных диодов на основе структуры типа 2 обладают лучшей линейностью ватт-амперных характеристик в непрерывном и импульсном режимах генерации по сравнению с линейками лазерных диодов на основе структуры типа 1.

### 1. Введение

Линейки лазерных диодов (ЛЛД) являются одним из основных компонентов систем накачки твердотельных лазеров. Линейки лазерных диодов, излучающие на длине волны 850 нм, в основном применяются для накачки твердотельных лазеров на основе кристаллов, легированных неодимом [1].

Наиболее идеальной с технологической точки зрения для создания гетероструктур, излучающих на длине волны 850 нм, является система твердых растворов AlGaAs. Это связано с тем, что твердые растворы  $Al_xGa_{1-x}As$  имеют малые рассогласования по периоду решетки с подложкой GaAs во всем диапазоне составов  $x$ . Но даже такие малые рассогласования создают значительные внутренние механические напряжения в структуре, обусловленные значительной толщиной лазерной гетероструктуры. В результате этого может происходить искривление структуры, которое может ухудшить качество монтажа кристалла на теплоотвод и характеристики прибора. Особенно существенным этот фактор может быть при больших линейных размерах прибора (например, в одиночных лазерах с длинным резонатором или ЛЛД). Для уменьшения внутренних механических напряжений в структуре на основе твердых растворов AlGaAs можно использовать введение в состав данного твердого раствора фосфора. Данный подход использовался для ЛЛД в работе [2] и нами для одиночных лазерных диодов с длинным резонатором в работах [3,4]. В работе [2] использовалась структура, в которой фосфор вводился в эмиттерные слои в таком количестве, чтобы обеспечить суммарные напряжения в структуре, близкие к нулю. В работах [3,4] были использованы структуры с компенсацией фосфором в различных слоях структуры. Состав по фосфору подбирался также исходя из обеспечения нулевых суммарных напряжений в структуре. В работах [2,3] показано, что введение фосфора

приводит к уменьшению искривления гетероструктуры по сравнению со структурой без фосфора. В работе [2] показано, что использование скомпенсированной гетероструктуры AlGaAsP/GaAs улучшает ближнее поле ЛЛД и способствует сохранению наклона ватт-амперной характеристики при высоких токах накачки по сравнению с ЛЛД на основе AlGaAs/GaAs. В работе [4] было показано, что лазерные диоды на основе гетероструктур со слоями, имеющими в составе фосфор, имели высокую линейность ватт-амперной характеристики вплоть до токов накачки (6 А), соответствующих максимальной выходной мощности. В структуре без фосфора в слоях линейность ватт-амперной характеристик сохранялась до токов накачки 4 А. Кроме того, лазерные диоды на основе структур с фосфором в слоях имеют более высокие значения характеристических температур по сравнению со структурой без фосфора в слоях. Наилучшими характеристиками обладали лазерные диоды на основе гетероструктуры со слоями, имеющими фосфор одновременно в волноводах и эмиттерах.

В данной работе были исследованы ЛЛД на основе гетероструктур без компенсации внутренних механических напряжений в структуре AlGaAs/GaAs и с компенсацией внутренних механических напряжений в структуре за счет одновременного введения фосфора в волноводные и эмиттерные слои AlGaAsP/GaAs.

### 2. Экспериментальные образцы

Исследуемые структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS3100 с реактором вертикального типа и резистивным нагревом подложкодержателя. Давление в реакторе — 77 Торр, скорость вращения подложкодержателя — 1000 об./мин, температура роста — 750°C. В качестве источников служили триметилгаллий ( $Ga(CH_3)_3$ ), триметилалюминий ( $Al(CH_3)_3$ ), арсин ( $AsH_3$ ) и фосфин ( $PH_3$ ). В качестве легирующей примеси для получения

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

Описание лазерной гетероструктуры

№	Слой	Состав	Состав у		Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина, мкм
			Тип 1	Тип 2		
1	<i>n</i> -Подложка	GaAs(100)	—	—	$2 \cdot 10^{18}$	450
2	<i>n</i> -буфер	GaAs:Si	—	—	$2 \cdot 10^{18}$	0.5
3	<i>n</i> -Эмиттер	Al <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As <sub>1-y</sub> P <sub>y</sub> :Si	0	0.014	$8 \cdot 10^{17}$	1.5
4	Волновод	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As <sub>1-y</sub> P <sub>y</sub>	0	0.01	Нелегирован	0.5
5	Активная область (КЯ)	GaAs	—	—	»	~ 105
6	Волновод	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As <sub>1-y</sub> P <sub>y</sub>	0	0.01	»	0.5
7	<i>p</i> -Эмиттер	Al <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As <sub>1-y</sub> P <sub>y</sub> :Mg	0	0.014	$2 \cdot 10^{18}$	1.5
8	Контактный <i>p</i> -слой	GaAs:Mg	—	—	$2 \cdot 10^{19}$	0.3

*n*- и *p*-типа проводимости использовались моносилан (SiH<sub>4</sub>) и бисциклопентодиенил магния (Mg(C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>) соответственно. В качестве газа-носителя использовался водород (H<sub>2</sub>). Рост структур осуществлялся на подложках *n*-GaAs(100).

Для исследований было выращено два типа симметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения: 1 — и волноводные, и эмиттерные слои состоят из твердого раствора AlGaAs, т.е. в структуре не применяется компенсация внутренних напряжений; 2 — и волноводные, и эмиттерные слои выращены из AlGaAsP, т.е. компенсация внутренних напряжений происходит в каждом Al-содержащем слое. Структуры были аналогичны структурам из работы [4]. Данная структура с компенсацией внутренних напряжений была выбрана исходя из того, что лазерные диоды на ее основе обладали наилучшими характеристиками по сравнению с лазерными диодами на основе структур с другими комбинациями компенсирующих слоев, исследованными в [4]. Подробное описание структур приведено в таблице.

На основе обоих типов лазерных гетероструктур были изготовлены лазерные элементы с шириной полоска  $W = 100$  мкм и длиной резонатора  $L = 1600$  мкм. Из лазерных элементов были сформированы ЛЛД шириной  $D = 5$  мм из 12 лазерных диодов с коэффициентом заполнения 24%. На переднюю и заднюю грань резонатора методом магнетронного распыления были нанесены диэлектрические покрытия Si/SiO<sub>2</sub> с коэффициентами отражения по мощности 5 и 95% соответственно. ЛЛД напаивались полосками вниз с помощью индиевого припоя на медные теплоотводы. Исследования лазерных характеристик проводились при 20°С.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены вольт- и ватт-амперные характеристики в непрерывном режиме генерации для ЛЛД на основе 2 типов лазерных гетероструктур. Из рис. 1 видно, что вольт-амперные характеристики для обоих типов структур достаточно близки. Напряжения отсечки

для обеих структур находятся вблизи 1.46 В, а последовательное дифференциальное сопротивление  $R_S$  для структуры типа 1 составляет 23 мОм, а для структуры типа 2 — 19 мОм. Напряжения отсечки, соответствующие энергии кванта излучения активной области, и низкие последовательные сопротивления для обоих типов структур свидетельствуют об отсутствии дополнительных электрических барьеров и оптимальном профиле легирования данных структур. Следует отметить, что ватт-амперная характеристика ЛЛД на основе структуры типа 2 имеет высокую линейность практически до токов накачки, соответствующих максимальному значению мощности 19 Вт, и ее наклон составляет 1 Вт/А. Структура типа 1 имеет линейность ватт-амперной характеристики, аналогичную структуре типа 2 до токов накачки порядка 13 А. При дальнейшем увеличении токов накачки в структуре типа 1 наблюдается изменение наклона, которое составляет 0.83 Вт/А. Высокая линейность ватт-амперной характеристики во всем диапазоне токов

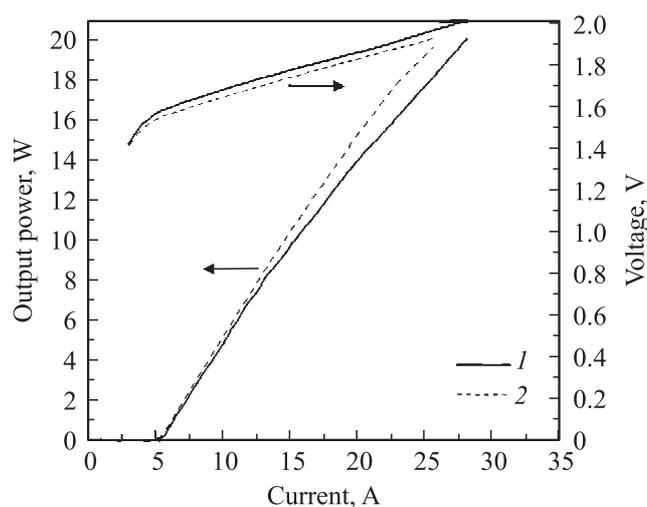
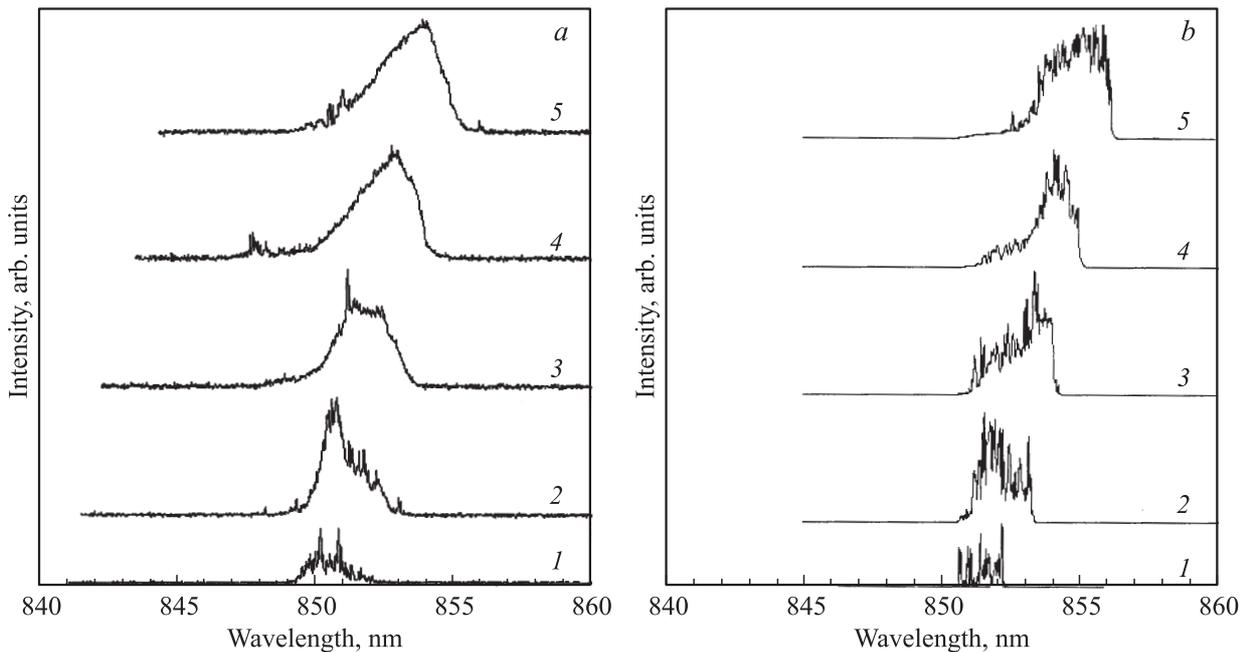


Рис. 1. Вольт- и ватт-амперные характеристики в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 20°С для линеек лазерных диодов (1 — на основе гетероструктуры типа 1; 2 — на основе гетероструктуры типа 2) с диэлектрическими покрытиями AR (5%)/HR(95%).



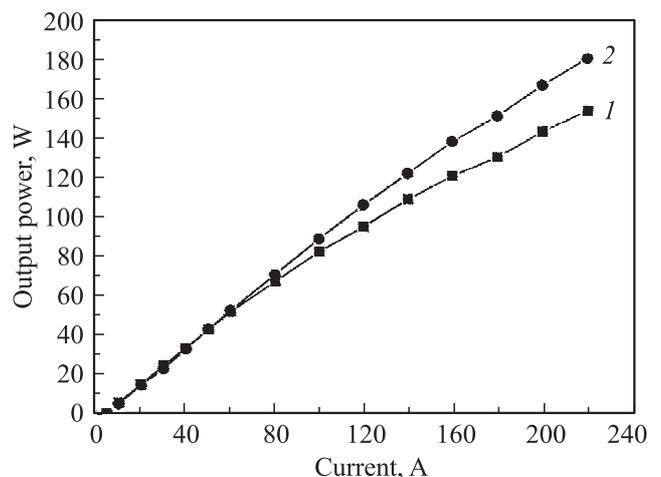
**Рис. 2.** Спектры излучения линеек лазерных диодов (*a* — на основе гетероструктуры типа 1; *b* — на основе гетероструктуры типа 2) при различных токах накачки, А: 1 — 3, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 8, 5 — 10.

накачки для структуры типа 2 можно объяснить тем, что за счет введения в эмиттерные и волноводные слои фосфора происходит уменьшение суммарных внутренних механических напряжений в структуре. В результате этого уменьшается изгиб гетероструктуры, что было показано в работах [2,4]. Уменьшение изгиба гетероструктуры позволяет обеспечить более лучший контакт ЛЛД на ее основе с теплоотводом по всей площади и, как следствие, лучший отвод тепла при больших токах накачки. Данный эффект наблюдался в одиночных лазерных диодах [4], работающих в непрерывном режиме генерации, и ЛЛД [2], работающих в квазинепрерывном режиме.

На рис. 2 показаны спектры лазерной генерации для ЛЛД на основе структур типа 1 (*a*) и типа 2 (*b*) от токов накачки. Для обоих типов структур сдвиг спектра составил около 4 нм при изменении тока накачки с 3 до 10 А.

Также были проведены исследования мощностных характеристик для ЛЛД на основе обоих типов структур в импульсном режиме. Для этого был использован импульсный генератор тока с длительностью импульса 100 нс, частотой повторения 1 кГц и током в импульсе до 250 А. На рис. 3 приведены ватт-амперные характеристики в импульсном режиме генерации для ЛЛД на основе обоих типов структур. Из рис. 3 видно, что до токов накачки 60 А зависимости для обоих типов структур полностью совпадают. При токах больше 60 А зависимость для структуры типа 1 начинает резко отклоняться от линейного характера поведения. Для структуры типа 2 линейный характер зависимости

ватт-амперной характеристики сохраняется до токов накачки 120 А. При токах больше 120 А наблюдается незначительное отклонение от линейного характера поведения. Максимальная мощность в импульсном режиме для ЛЛД на основе структуры типа 1 составила 150 Вт, а для ЛЛД на основе структуры типа 2 — 180 Вт. Отклонение ватт-амперных характеристик от линейного характера, по нашему мнению, связано с тепловым разогревом ЛЛД при достаточно больших токах накачки.



**Рис. 3.** Ватт-амперные характеристики в импульсном режиме генерации (100 нс, 1 кГц) при температуре теплоотвода 20 °С для линеек лазерных диодов (1 — на основе гетероструктуры типа 1; 2 — на основе гетероструктуры типа 2) с диэлектрическими покрытиями AR (5%)/HR (95%).

ки. Использование компенсации суммарных внутренних механических напряжений в структуре типа 2 позволяет для ЛЛД в импульсном режиме генерации обеспечить более хороший отвод тепла при больших токах накачки по сравнению со структурой типа 1, в которой компенсации напряжений нет. Таким образом, в импульсном режиме генерации ЛЛД ведут себя аналогично ЛЛД в непрерывном режиме генерации в зависимости от типа структуры.

#### 4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены 2 типа лазерных гетероструктур — лазерная гетероструктура без компенсации внутренних напряжений, с эмиттерными и волноводными слоями из твердого раствора AlGaAs (тип 1), и лазерная гетероструктура с компенсацией напряжений, с эмиттерными и волноводными слоями AlGaAsP (тип 2). Состав фосфора в структуре типа 2 подбирался с учетом обеспечения полной компенсации внутренних механических напряжений в структуре. Из структур были изготовлены линейки лазерных диодов шириной 5 мм из 12 лазерных диодов с шириной полоска 100 мкм (коэффициент заполнения 24%). Мощностные характеристики исследовались в непрерывном и импульсном режимах генерации.

В непрерывном режиме генерации максимальная мощность ЛЛД для обоих типов структур составила около 19 Вт. При этом линейный характер ватт-амперной характеристики для структуры типа 2 сохранялся до токов накачки, соответствующих максимальной выходной мощности, а для структуры типа 1 до токов накачки порядка 13 А.

В импульсном режиме генерации (100 нс, 1 кГц) максимальная мощность ЛЛД на основе структуры типа 1 составила 150 Вт, а на основе структуры типа 2 — 180 Вт. Ватт-амперная характеристика ЛЛД на основе структуры 1 имела линейный характер до токов накачки 60 А и при дальнейшем увеличении имела сильное отклонение от линейности. ЛЛД на основе структуры типа 2 имела линейный характер ватт-амперной характеристики до токов 120 А и при дальнейшем увеличении незначительно отклонялась от линейного характера поведения.

По нашему мнению, более высокая линейность ватт-амперных характеристик в непрерывном и импульсном режимах генерации для ЛЛД на основе структуры типа 2 связана с более качественным контактом ЛЛД по всей площади с теплоотводом за счет меньшего изгиба гетероструктуры, что обеспечивает более хороший отвод тепла от ЛЛД при больших токах накачки по сравнению с ЛЛД на основе структуры типа 1.

Работа выполнена в рамках программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, соглашение 8249.

#### Список литературы

- [1] K. Shighara, Y. Nagai, S. Karadida, A. Takami, Y. Kokubo, H. Matsubara, S. Kakimoto. IEEE J. Quant. Electron., **27**, 1537 (1991).
- [2] А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, И.В. Яроцкая, В.А. Панарин, Г.Т. Микаелян. Квант. электрон., **42**(1), 15 (2012).
- [3] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов. ФТП, **46**(10), 1344 (2012).
- [4] Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, В.В. Шамахов, К.В. Бахвалос, В.В. Васильева, Л.С. Вавилова, М.Г. Растегаева, И.С. Тарасов. ФТП, **47**(8), 1078 (2013).

Редактор Т.А. Полянская

#### Diode laser bars based on AlGaAsP/GaAs heterostructures emitting at 850 nm wavelength

V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, A.V. Lyutetskiy, K.V. Bakhvalov, M.G. Rastegaeva, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov

Ioffe Physico-technical Institute of the Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russian

**Abstract** Two types of laser heterostructures — without compensation of internal mechanical stress, with AlGaAs-based waveguide and cladding layers (type 1) and with compensation of internal mechanical stress, with AlGaAsP-based waveguide and cladding layers (type 2) have been grown by MOCVD epitaxy. Diode laser bars of 5 mm width and 24% fill factor emitting at 850 nm have been manufactured. Power characteristics at continuous wave (CW) and pulse regimes have been investigated. It has been shown, that diode laser bars based on heterostructures of type 2 possess better linearity of light-current characteristics at CW and pulse regime than bars based on type 1 heterostructures.