

Характеристики лазерных диодов, излучающих на длине волны 850 нм, с различными способами компенсации внутренних механических напряжений в гетероструктуре AlGaAs(P)/GaAs

© Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, В.В. Шамахов, К.В. Бахвалов, В.В. Васильева, Л.С. Вавилова, М.Г. Растегаева, И.С. Тарасов[¶]

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

(Получена 5 декабря 2012 г. Принята к печати 10 декабря 2012 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены лазерные гетероструктуры AlGaAsP/GaAs как без компенсации, так и с компенсацией внутренних механических напряжений путем введения в различные слои гетероструктуры фосфора, изменяющего параметр решетки слоя и тем самым влияющего на величину внутренних напряжений во всей лазерной гетероструктуре. Из структур изготовлены многомодовые мезаполосковые лазерные диоды с апертурой 100 мкм, излучающие на длине волны 850 нм, и исследованы их свойства. Показано, что структуры с компенсацией внутренних механических напряжений обладают линейностью ватт-амперной характеристики вплоть до токов накачки, соответствующих максимальной выходной мощности. Также структуры с компенсацией внутренних механических напряжений имеют более высокие значения характеристических температур T_0 и T_1 по сравнению со структурой без компенсации внутренних механических напряжений.

1. Введение

Мощные лазеры, излучающие на длине волны $\lambda = 850$ нм, в основном применяются для накачки твердотельных лазеров на основе кристаллов, легированных неодимом [1].

Для создания таких лазерных диодов используют систему алюминийсодержащих твердых растворов AlGaAs [2–4] или безалюминиевую систему твердых растворов GaInAsP [5,6] в слоях активной области и волновода.

При этом с технологической точки зрения наиболее предпочтительной является система твердых растворов AlGaAs, так как она имеет очень малое рассогласование по периоду решетки с подложкой GaAs во всем диапазоне составов (максимальное значение рассогласования получается для AlAs и составляет $1.18 \cdot 10^{-3}$). Однако даже такие малые рассогласования создают существенные внутренние механические напряжения в структуре, обусловленные значительной толщиной лазерной гетероструктуры, которые приводят к ее искривлению. В работах [4,7] было показано, что уменьшение изгиба гетероструктур при создании приборов, характеризующихся большими линейными размерами, приводит к улучшению характеристик приборов. В работе [4] показано, что уменьшение суммарных напряжений в структуре за счет введения фосфора, т.е. замена эмиттерных слоев AlGaAs на AlGaAsP, улучшает линейное распределение излучающих элементов в ближнем поле линеек лазерных диодов и способствует сохранению линейности ватт-амперной характеристики при более высоких токах накачки благодаря однородному контакту с теплоотводом всех излучающих элементов. В работе [7] показано, что замена эмиттерных и волноводных слоев AlGaAs на

слои AlGaAsP позволила повысить выходную мощность в непрерывном режиме генерации с 3.5 до 4.1 Вт на зеркало.

Целью данной работы являлось исследование характеристик лазерных диодов ($\lambda = 850$ нм) на основе лазерных структур AlGaAs(P)/GaAs с компенсацией напряжений путем изменения параметра решетки в различных слоях структуры.

2. Экспериментальные образцы

Исследуемые структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) 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(CH₃)₃, триметилалюминий, Al(CH₃)₃, арсин, AsH₃, и фосфин, PH₃. В качестве легирующих компонентов для получения *n*- и *p*-типа проводимости использовались моносилан, SiH₄, и бисциклопентодиенил магния, Mg(C₅H₅)₂, соответственно. В качестве газа-носителя использовался водород, H₂. Рост структур осуществлялся на подложках *n*-GaAs(100).

Для исследований нами было выращено 4 типа симметричных лазерных гетероструктур отдельного 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; 3 — волноводные слои состоят из AlGaAs, а эмиттерные — из AlGaAsP, и

[¶] E-mail: Tarasov@hpld.ioffe.ru

Таблица 1. Описание лазерной гетероструктуры

№ слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, см ⁻³	Толщина, мкм
1	<i>n</i> -подложка	GaAs(100)	2 · 10 ¹⁸	450
2	<i>n</i> -буфер	GaAs:Si	2 · 10 ¹⁸	0.5
3	<i>n</i> -эмиттер	Al _{0,4} Ga _{0,6} As _{1-y} P _y :Si	8 · 10 ¹⁷	1.5
4	Волновод	Al _{0,3} Ga _{0,7} As _{1-y} P _y	Не легирован	0.5
5	Активная область (КЯ)	GaAs	Не легирован	~ 105
6	Волновод	Al _{0,3} Ga _{0,7} As _{1-y} P _y	Не легирован	0.5
7	<i>p</i> -эмиттер	Al _{0,4} Ga _{0,6} As _{1-y} P _y :Mg	2 · 10 ¹⁸	1.5
8	Контактный <i>p</i> -слой	GaAs:Mg	2 · 10 ¹⁹	0.3

Таблица 2. Расчетные значения содержания фосфора для различных типов структур

Тип структуры	Волноводный слой Al _{0,3} Ga _{0,7} As _{1-y} P _y	Эмиттерный слой Al _{0,4} Ga _{0,6} As _{1-y} P _y
1	0	0
2	0.01	0.014
3	0	0.017
4	0.05	0

компенсация напряжений происходит за счет изменения параметра решетки эмиттерных слоев; 4 — волноводные слои — AlGaAsP, а эмиттерные — AlGaAs, компенсация напряжений в структуре осуществляется за счет волноводных слоев. Общее описание структур дано в табл. 1.

Подбор содержания фосфора для структур осуществлялся таким образом, чтобы параметр эквивалентной деформации (параметр вводится заменой многослойной гетероструктуры на структуру, состоящую из одного слоя с усредненным значением несоответствия периода решетки слоя с подложкой) был равен нулю. Методика расчета приведена в [7]. В табл. 2 указаны расчетные значения содержания фосфора для различных типов структур, обеспечивающие полную компенсацию внутренних напряжений в структуре.

Далее из гетероструктур с использованием известных постростовых процедур [8,9] были изготовлены мезаполосковые многомодовые полупроводниковые лазеры с апертурой излучения $W = 100$ мкм. Образцы лазерных диодов изготавливались с различной длиной резонатора $L = 1500 - 3000$ мкм. Исследования лазерных характеристик проводились в непрерывном режиме генерации в диапазоне температур теплоотвода 10–70°C.

3. Экспериментальные результаты

Хотелось бы отметить, что в лазерных диодах на основе гетероструктуры типа 4 с волноводными слоями AlGaAsP и эмиттерными слоями AlGaAs не наблюдалось генерации лазерного излучения, в отличие от остальных типов структур. По нашему мнению, это

связано с релаксацией упругих напряжений в структуре за счет того, что для полной компенсации внутренних механических напряжений необходимо ввести достаточно большое количество фосфора в волноводные слои, чтобы скомпенсировать напряжения еще и в эмиттерных слоях. При данном содержании фосфора толщина волноводных слоев, скорее всего, превышает значение критической толщины для данного состава.

На рис. 1 приведены зависимости обратной дифференциальной эффективности ($1/\eta_d$) от длины резонатора Фабри–Перо (L) для различных типов структур. Из зависимостей при бесконечно малой длине резонатора было определено значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения η_i . Самое высокое значение $\eta_i = 96\%$ соответствует структуре с эмиттерными и волноводными слоями AlGaAsP (тип 1), и, значит, такая структура обладает меньшими токовыми утечками за порогом генерации по сравнению со структурами типов 2 и 3. Также было определено значение внутренних оптических потерь α_i . Из полученных значений видно (см. рис. 1), что наличие слоев, содержащих фосфор,

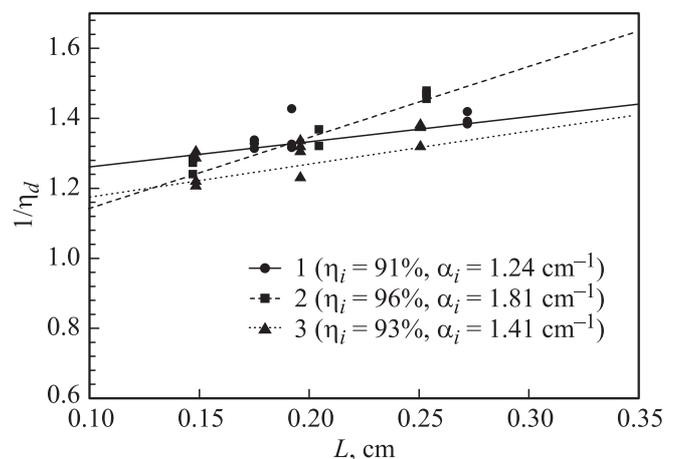


Рис. 1. Зависимости обратной дифференциальной эффективности $1/\eta_d$ от длины резонатора Фабри–Перо L лазерных диодов на основе лазерных гетероструктур типа 1 (волноводные и эмиттерные слои AlGaAs), типа 2 (волноводные и эмиттерные слои AlGaAsP), типа 3 (волноводные слои AlGaAs и эмиттерные слои AlGaAsP).

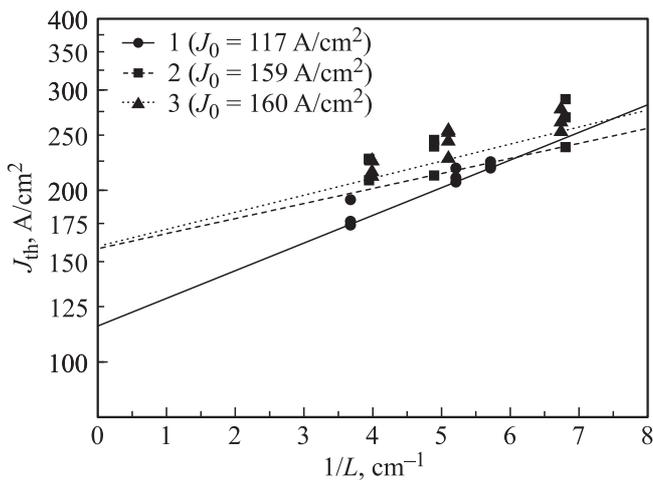


Рис. 2. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} от обратной длины резонатора $1/L$ лазерных диодов на основе лазерных гетероструктур типа 1 (волноводные и эмиттерные слои AlGaAs), типа 2 (волноводные и эмиттерные слои AlGaAsP), типа 3 (волноводные слои AlGaAs и эмиттерные слои AlGaAsP).

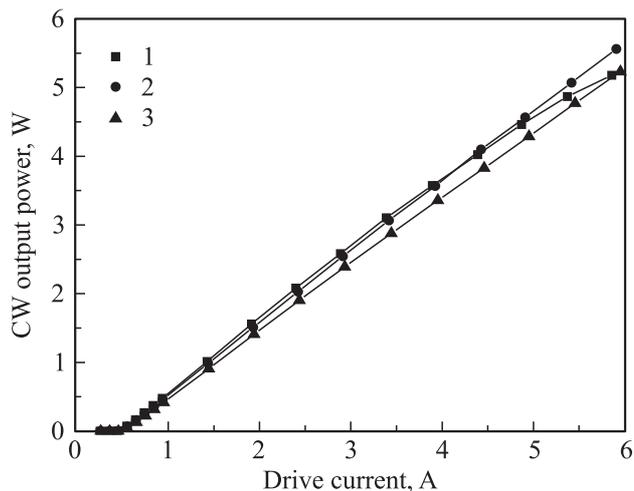


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики при 20°C лазерных диодов ($W = 100$ мкм, $L = 2500$ мкм) на основе лазерных гетероструктур типа 1 (волноводные и эмиттерные слои AlGaAs), типа 2 (волноводные и эмиттерные слои AlGaAsP), типа 3 (волноводные слои AlGaAs и эмиттерные слои AlGaAsP).

увеличивает значение α_i . Особенно существенным для оптических потерь является наличие фосфора в волноводных слоях. Так, в структуре без фосфора в слоях α_i составляет 1.24 см^{-1} , а для структуры с фосфором в волноводных и эмиттерных слоях $\alpha_i = 1.81 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 2 приведены зависимости пороговой плотности тока (J_{th}) от обратной длины резонатора ($1/L$) полупроводниковых лазеров, изготовленных из различных типов структур. Из зависимостей были определены минимальные значения пороговой плотности тока (J_0) при длине резонатора, устремляющейся к бесконеч-

ности, что соответствует нулевым потерям на выход из резонатора Фабри–Перо. Наименьшим значением $J_0 = 117 \text{ А/см}^2$ обладала структура типа 1 (без фосфора), а структуры типов 2 и 3 имели более высокие значения J_0 . Для структур типов 2 и 3 значения J_0 составили $\sim 160 \text{ А/см}^2$.

На рис. 3 приведены ватт-амперные характеристики в режиме непрерывной генерации (CW) для лазеров ($W = 100$ мкм, $L = 2500$ мкм) из различных типов структур. Из рис. 3 видно, что структуры типов 1, 2 и 3 обладают примерно одинаковой максимальной выходной мощностью, ~ 5 Вт. Максимальная мощность оптического излучения была ограничена катастрофической оптической деградацией выходного зеркала. Просветляющее покрытие на выходных зеркалах было нанесено без пассивации кристаллической поверхности зеркала, что и служило причиной деградации. Следует отметить, что структуры, содержащие фосфор, обладают более высокой линейностью ватт-амперной характеристики вплоть до токов накачки, соответствующих максимальному значению мощности, в то время как в структуре без фосфора линейность сохраняется только до токов накачки ~ 4 А. При этом наклон ватт-амперных характеристик на линейном участке для структуры без фосфора (тип 1) и структуры с фосфором типа 2 практически одинаков. Более высокая линейность ватт-амперных характеристик в структурах, содержащих фосфор (типов 2 и 3), может быть связана с компенсацией суммарных внутренних механических напряжений в структурах, что позволяет обеспечить лучший контакт лазерного диода с теплоотводом по всей его длине и, как следствие, более эффективный отвод тепла при больших токах накачки. Данный факт наблюдался авторами в [4] при исследовании линеек лазерных диодов.

Также были проведены исследования температурной зависимости пороговой плотности тока (характеристическая температура T_0) и дифференциальной эффективности (характеристическая температура T_1). В табл. 3 приведены значения T_0 и T_1 для различных типов структур. Из таблицы видно, что более высокие значения T_0

Таблица 3. Значения T_0 и T_1 для разных типов структур, измеренные в диапазоне температур 10–70°C

Тип структуры	Длина резонатора, мкм	T_0 , К	T_1 , К
1	1700	150	750
	1900	190	590
	2700	200	475
2	1500	180	915
	2000	220	795
	2500	235	490
3	1500	155	850
	2000	200	700
	2500	210	480

и T_1 имеют структуры с компенсацией внутренних механических напряжений, что можно объяснить более эффективным отводом тепла от лазерного диода. При этом следует отметить, что в зависимости от длины резонатора L во всех типах структур наблюдается одинаковое поведение T_0 и T_1 . Для всех структур T_0 с увеличением L возрастает, что связано с уменьшением пороговой плотности в результате снижения потерь на выход. Для всех структур T_1 с увеличением L падает, что связано с уменьшением потерь на выходе и возрастанием суммарных внутренних потерь.

4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены 4 типа лазерных гетероструктур — лазерная гетероструктура без компенсации внутренних напряжений, с эмиттерными и волноводными слоями из твердого раствора AlGaAs, и лазерные гетероструктуры со слоями AlGaAsP с компенсацией напряжений за счет волноводных, эмиттерных или обоих слоев сразу. Слои с фосфором подбирались с учетом обеспечения полной компенсации внутренних механических напряжений в структуре. Из структур были изготовлены многомодовые мезаполосковые лазерные диоды с шириной полоска $W = 100$ мкм, и исследованы их характеристики.

Наибольшая максимальная выходная мощность 5.5 Вт в непрерывном режиме генерации была получена на структуре с волноводными и эмиттерными слоями AlGaAsP. Также следует отметить, что структуры с компенсацией механических внутренних напряжений (имеющие слои AlGaAsP) обладали высокой линейностью ватт-амперной характеристики вплоть до токов накачки, соответствующих максимальной выходной мощности. В структуре без компенсации внутренних механических напряжений линейность ватт-амперной характеристики сохранялась до токов накачки 4 А.

В лазерных диодах на основе гетероструктуры с волноводным слоем AlGaAsP генерация лазерного излучения не наблюдалась. По нашему мнению, это связано с релаксацией упругих напряжений в гетероструктуре.

Лазерные диоды на основе структур, имеющих компенсацию внутренних механических напряжений, имеют более высокие значения характеристических температур T_0 и T_1 по сравнению со структурой без компенсации.

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.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. ФТП, **40** (5), 628 (2006).
- [3] М.А. Ладугин, Ю.П. Коваль, А.А. Мармалюк, В.А. Петровский. Тез. докл. III Росс. симп. „Полупроводниковые лазеры: физика и технология“ (СПб., Россия, 2012) с. 17.
- [4] А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, И.В. Яроцкая, В.А. Панарин, Г.Т. Микаелян. Квант. электрон., **42** (1), 15 (2012).
- [5] N. Tansu, D. Zhou, L.J. Mawst. IEEE Photon. Technol. Lett., **12** (6), 603 (2000).
- [6] W.E. Plano, J.S. Major, D.F. Welch. IEEE Photon. Technol. Lett., **6** (4), 465 (1994).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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

850 nm diode lasers with various compensation techniques of internal mechanical stress in AlGaAs(P)/GaAs heterostructure

D.A. Vinokurov, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, V.V. Shamakhov, K.V. Bakhvalov, V.V. Vasilyeva, L.S. Vavilova, M.G. Rastegaeva, I.S. Tarasov

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

Abstract AlGaAsP/GaAs laser heterostructures with and without compensation of internal mechanical stress have been grown by MOCVD epitaxy. Compensation of internal mechanical stress has been done by introducing phosphorous in different heterostructure layers thus changing its lattice parameter. Mesastripe 100 μm aperture diode lasers based on such heterostructures have been manufactured and investigated. It has been shown that diode lasers based on heterostructures with compensation of internal mechanical stress possess linearity of the light-current characteristic up to maximum output power and the higher values of T_0 and T_1 parameters than those of heterostructures without compensation.