

Лазерные диоды, излучающие на длине волны 850 нм, на основе гетероструктур AlGaAsP/GaAs

© 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

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

(Получена 9 апреля 2012 г. Принята к печати 16 апреля 2012 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs выращены и исследованы лазерные гетероструктуры с волноводными и эмиттерными слоями из твердых растворов AlGaAs и AlGaAsP. Показано, что гетероструктура, содержащая слой AlGaAsP, имеет больший радиус кривизны по сравнению со структурой, состоящей из слоев AlGaAs. Из лазерной гетероструктуры AlGaAsP/GaAs изготовлены и исследованы мезаполосковые лазеры с апертурой 100 мкм. Лазеры имели внутренние оптические потери 0.75 см^{-1} и характеристический параметр $T_0 = 140 \text{ К}$ в диапазоне температур 20–70°C. Максимальная выходная оптическая мощность на одно зеркало достигала 4.1 Вт и генерация в непрерывном режиме сохранялась при температуре тепловода 120°C.

1. Введение

Мощные лазеры, излучающие на длине волны 850 нм, в основном применяются для накачки твердотельных лазеров на основе кристаллов, легированных неодимом [1]. Поэтому одной из актуальных задач для таких лазеров является достижение максимальных выходных оптических характеристик.

На сегодняшний день для создания лазеров, излучающих на длине волны 850 нм, можно использовать систему алюминийсодержащих твердых растворов [2] или систему безалюминиевых твердых растворов [3,4] в слоях активной области и волновода. Максимальная оптическая мощность в непрерывном режиме генерации в лазерах, излучающих на данной длине волны, была получена на основе алюминийсодержащих гетероструктур и составила 7.5 Вт (3.5 Вт на зеркало) [2].

При этом следует учитывать, что свойства алюминийсодержащей системы твердых растворов Al–Ga–As хорошо изучены и данная система имеет неоспоримые технологические преимущества, поскольку имеет очень слабое рассогласование по периоду решетки с подложкой GaAs во всем диапазоне составов (максимальное значение рассогласования получается для AlAs и составляет $1.18 \cdot 10^{-3}$). Даже такое малое рассогласование по периоду решетки с подложкой GaAs создает существенные внутренние механические напряжения в структуре, обусловленные значительной толщиной слоев, составляющих лазерную гетероструктуру, которые приводят к ее искривлению. Известно, что изгиб гетероструктуры за счет механических напряжений оказывает существенное влияние на характеристики лазерных линеек (которые характеризуются большими линейными размерами при большом числе излучающих элементов). В работе [5] 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 высоких токах накачки благодаря однородному контакту с теплопроводом всех излучающих элементов. Однако современное развитие концепции мощных полупроводниковых лазеров привело к созданию гетероструктуры с малыми значениями внутренних оптических потерь, что позволяет делать лазеры с большой длиной резонатора (до 3000–4000 мкм) без заметного снижения дифференциальной квантовой эффективности, достигая тем самым больших значений выходной оптической мощности. При таких больших линейных размерах искривление гетероструктуры за счет механических напряжений также может оказывать влияние и на характеристики лазерного диода.

Цель данной работы — исследование характеристик лазеров, излучающих на длине волны 850 нм, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs в алюминиевой системе твердых растворов Al–Ga–As–P.

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(CH₃)₃, триметилалюминий Al(CH₃)₃, арсин AsH₃ и фосфин PH₃. В качестве легирующей примеси для получения *p*- и *n*-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).

[¶] E-mail: dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru

Таблица 1. Описание лазерной гетероструктуры типа 1

№	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 _{0.47} Ga _{0.53} As : Si	8 · 10 ¹⁷	1.5
4	Волновод	Al _{0.38} Ga _{0.62} As	Не легирован	1.05
5	Активная область (КЯ)	GaAs	Не легирован	~ 105 Å
6	Волновод	Al _{0.38} Ga _{0.62} As	Не легирован	0.65
7	<i>p</i> -Эмиттер	Al _{0.47} Ga _{0.53} As : Mg	2 · 10 ¹⁸	1.5
8	Контактный <i>p</i> -слой	GaAs : Mg	2 · 10 ¹⁹	0.3

Таблица 2. Описание лазерной гетероструктуры типа 2

№	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 _{0.47} Ga _{0.53} As _{0.99} P _{0.01} : Si	8 · 10 ¹⁷	1.5
4	Волновод	Al _{0.38} Ga _{0.62} As _{0.98} P _{0.02}	Не легирован	1.05
5	Активная область (КЯ)	GaAs	Не легирован	~ 105 Å
6	Волновод	Al _{0.38} Ga _{0.62} As _{0.98} P _{0.02}	Не легирован	0.65
7	<i>p</i> -Эмиттер	Al _{0.47} Ga _{0.53} As _{0.99} P _{0.01} : Mg	2 · 10 ¹⁸	1.5
8	Контактный <i>p</i> -слой	GaAs : Mg	2 · 10 ¹⁹	0.3

Для исследований кристаллических свойств было выращено два типа асимметричных гетероструктур с широким волноводом. Структура типа 1 представляла эмиттерные и волноводные слои AlGaAs и активную область GaAs. Структура типа 2 — эмиттерные и волноводные слои AlGaAsP и активную область GaAs. Подробное описание структур приведено в табл. 1 (структура типа 1) и 2 (структура типа 2).

Для анализа суммарного рассогласования был использован параметр эквивалентного несоответствия решеток F_{eq} [6]. Данный параметр заменяет многослойную гетероструктуру на структуру, состоящую из одного слоя с усредненным значением несоответствия периода решетки. Для определения F_{eq} вводится понятие эквивалентной деформации E_{eq} . Эти величины связаны между собой следующим образом: $F_{\text{eq}} = -E_{\text{eq}}$. Значение E_{eq} определяется следующим образом:

$$E_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=n}^m E_i H_i}{\sum_{i=n}^m H_i}, \quad (1)$$

где E_i — деформация i -го слоя гетероструктуры, H_i — толщина i -го слоя гетероструктуры; n — номер слоя в табл. 1 и 2 с описанием структур, соответствующих *n*-эмиттеру; m — номер слоя в табл. 1 и 2 с описанием структур, соответствующих контактному *p*-слою.

Величина деформации i -го слоя определялась из выражения

$$E_i = \frac{a_{\text{sub}} - a_i}{a_i}, \quad (2)$$

где a_{sub} — период решетки подложки, a_i — период решетки i -го слоя в недеформированном состоянии.

Для структуры типа 1 расчетное значение F_{eq} составило $5.2 \cdot 10^{-4}$, а для структуры типа 2 — $4 \cdot 10^{-5}$. Из расчетов видно, что в целом структура типа 2 напряжена меньше, чем структура типа 1, и соответственно должна иметь меньшую кривизну, чем структура типа 1.

Лазерные гетероструктуры исследовались методом рентгеновской дифрактометрии. Исследования проводились на двукристалльной установке в режиме θ - 2θ - и ω -сканирования. На рис. 1 приведена кривая дифракционного отражения для структуры типа 1. Помимо пика от подложки GaAs (пик 1) на кривой присутствуют еще 2 пика, соответствующих эмиттерным Al_{0.47}Ga_{0.53}As (пик 3) и волноводным слоям Al_{0.38}Ga_{0.62}As (пик 2). Пики от слоев расположены слева относительно пика подложки. Это означает, что периоды решеток слоев больше, чем подложка, т. е. слои являются сжато-напряженными. На рис. 2 приведена кривая дифракционного отражения для структуры типа 2. Пик 1 соответствует подложке GaAs, а пики 2 и 3 волноводным Al_{0.38}Ga_{0.62}As_{0.98}P_{0.02} и эмиттерным Al_{0.47}Ga_{0.53}As_{0.99}P_{0.01} слоям соответственно. Данное расположение пиков от слоев относительно подложки означает, что волноводный слой (пик 2) имеет период решетки

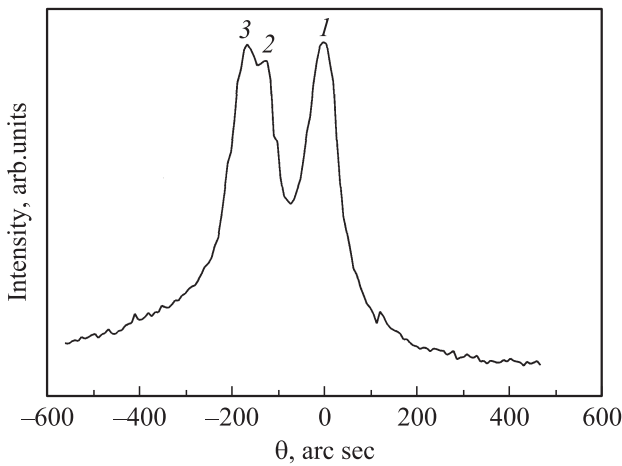


Рис. 1. Кривая дифракционного отражения $\theta-2\theta$ для структуры типа 1 (1 — пик от подложки GaAs, 2 — пик от волноводных слоев $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, 3 — пик от эмиттерных слоев $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$).

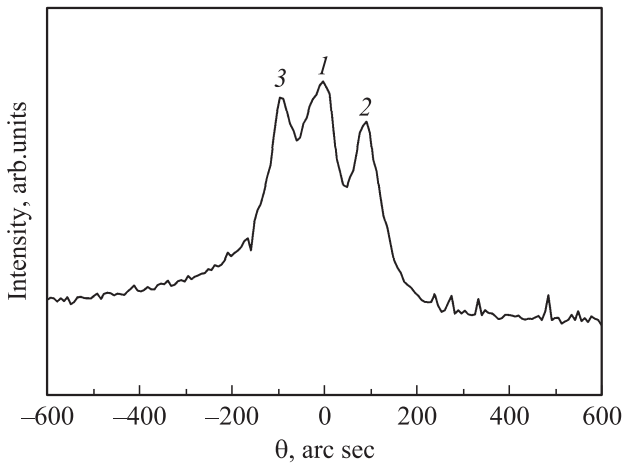


Рис. 2. Кривая дифракционного отражения $\theta-2\theta$ для структуры типа 2 (1 — пик от подложки GaAs, 2 — пик от волноводных слоев $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}_{0.98}\text{P}_{0.02}$, 3 — пик от эмиттерных слоев $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}_{0.99}\text{P}_{0.01}$).

ки меньше периода решетки подложки GaAs (растянуто-напряженный), а эмиттерный (пик 3) больше периода решетки подложки (сжато-напряженный), но меньше, чем период решетки эмиттерного слоя структуры типа 1 (рис. 1, пик 3). Также с помощью рентгеновской дифрактометрии были определены радиусы кривизны гетероструктур. Для структуры типа 1 радиус кривизны составил 100 м, а для структуры типа 2 — 230 м. Полученные данные отражают поведение по вычислениям эффективного рассогласования периода подложек.

Далее из гетероструктуры типа 2 с использованием известных построительных процедур [7,8] были изготовлены мезаполосковые многомодовые полупроводниковые лазеры с апертурой излучения $W = 100$ мкм. Образцы лазерных диодов изготавливались с различной длиной

резонатора $L = 2000-4000$ мкм. Исследования лазерных характеристик проводились в непрерывном режиме генерации в диапазоне температур теплоотвода $20-130^\circ\text{C}$.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 3 приведена зависимость обратной дифференциальной эффективности ($1/\eta_d$) от длины резонатора Фабри-Перо (L). Из зависимости при бесконечно малой длине резонатора было определено значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения η_i , которое составило величину, близкую к 100%. Такое значение η_i указывает на отсутствие токовых утечек за порогом генерации. Также было определено значение внутренних оптических потерь α_i , которое составило 0.75 см^{-1} . Величина внутренних оптических потерь получилась несколько выше величин, характерных для лазеров, изготовленных по концепции мощных полупро-

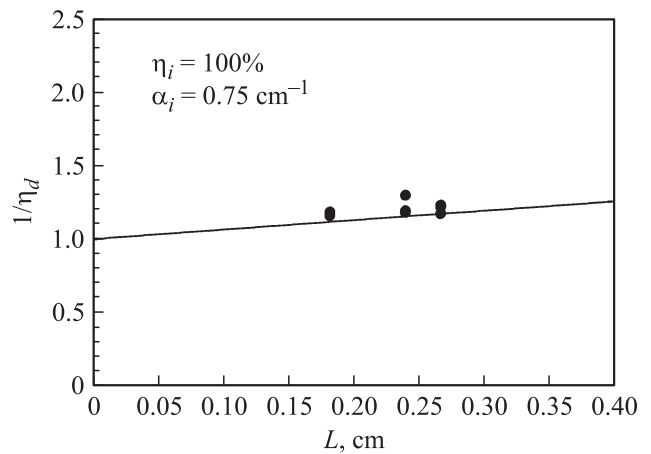


Рис. 3. Зависимость обратной дифференциальной эффективности $1/\eta_d$ от длины резонатора Фабри-Перо L лазерного диода с длиной волны излучения 850 нм.

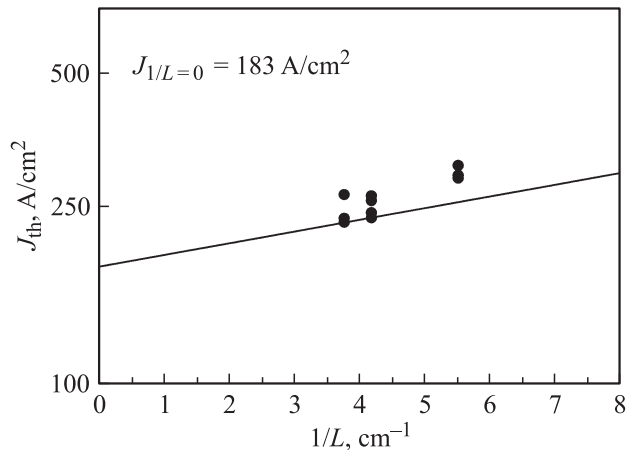


Рис. 4. Зависимость пороговой плотности тока J_{th} от обратной длины резонатора $1/L$ лазерного диода с длиной волны излучения 850 нм.

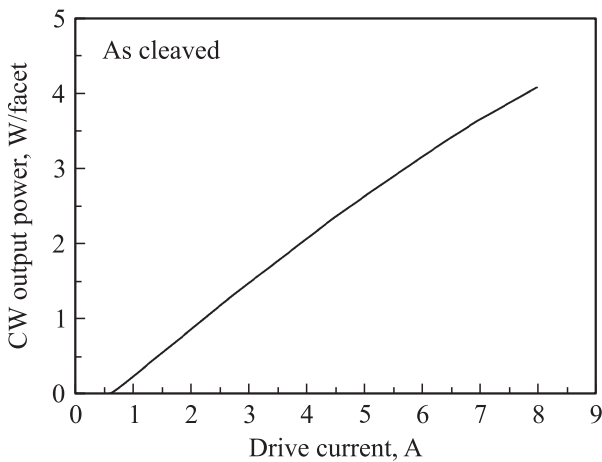


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика при 20°C лазерного диода с естественно сколотыми зеркалами с апертурой $W = 100$ мкм и длиной резонатора $L = 2500$ мкм, излучающего на длине волны 850 нм.

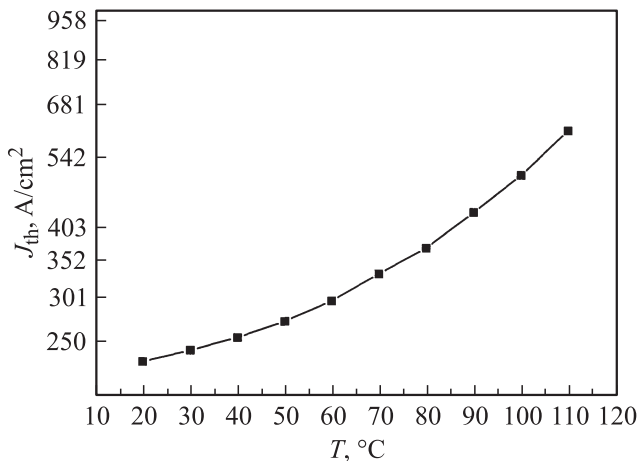


Рис. 6. Зависимость пороговой плотности тока J_{th} от температуры теплоотвода T лазерного диода, излучающего на длине волны 850 нм.

водниковых лазеров с расширенным волноводом, излучающих на длине волны 850 нм ($\alpha_i = 0.5 \text{ см}^{-1}$) [2], что может быть связано с применением фосфорсодержащих четверных твердых растворов, составляющих волноводные слои.

Была исследована зависимость пороговой плотности тока J_{th} от обратной длины резонатора $1/L$ полупроводникового лазера (рис. 4). Из зависимости было определено минимальное значение пороговой плотности тока при длине резонатора, устремляющейся к бесконечности, которое соответствует нулевым потерям на выходе из резонатора Фабри–Перо. Данное значение составило 183 А/см^2 , что также несколько выше значения 160 А/см^2 , представленного в работе [2]. Однако при этом максимально достигнутая выходная мощность в непрерывном режиме генерации при температуре 20°C составила 4.1 Вт на зеркало (наклон ватт-амперной

характеристики 0.62 Вт/А) (рис. 5), что выше, чем представленная в работе [2] для аналогичной по геометрическим параметрам структуры, излучающей на длине волны 850 нм, которая составляла 3.5 Вт на зеркало. Более высокая выходная оптическая мощность исследуемых полупроводниковых лазеров по сравнению с лазерами из статьи [2] связана, по нашему мнению, с введением фосфора в слои структуры, что уменьшает ее кривизну. Это позволяет при большой длине резонатора лазерного диода обеспечить лучший контакт с теплоотводом по всей его длине и лучший отвод тепла при высоких токах накачки.

На рис. 6 представлена зависимость величины пороговой плотности тока J_{th} от температуры теплоотвода лазерного диода T . Из зависимости видно, что на ней имеются два участка. Первый участок в диапазоне температур 20–70°C, на котором характеристическая температура T_0 составила величину 140 К, и второй в диапазоне температур 70–110°C, на котором T_0 уменьшалась до значения 67 К. По-видимому, именно уменьшение температурной стабильности при высоких рабочих температурах ограничивает возможность достижения более высоких значений выходной оптической мощности в непрерывном режиме генерации при высоких уровнях накачки.

На рис. 7 приведена ватт-амперная характеристика лазерного диода с естественно сколотыми зеркалами, с апертурой $W = 100$ мкм и длиной резонатора $L = 2700$ мкм при разных температурах теплоотвода. Измерения проводились до токов накачки 4 А, чтобы не допустить возможной деградации исследуемой лазерной гетероструктуры. Из рисунка видно, что линейность ватт-амперной характеристики нарушается уже при температуре 70°C. Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому снижению дифференциальной квантовой эффективности и линейности ватт-амперной

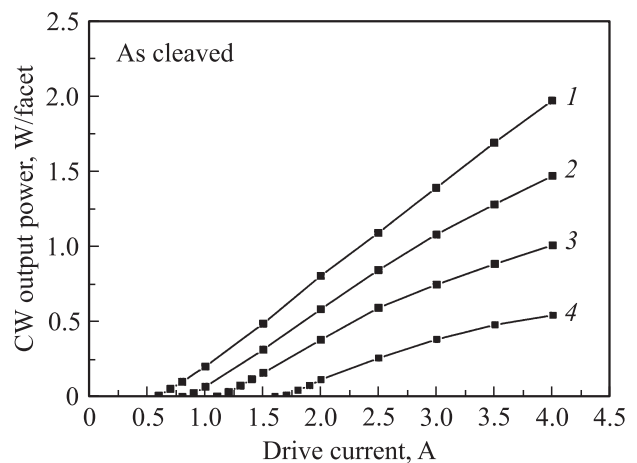


Рис. 7. Ватт-амперная характеристика лазерного диода с естественно сколотыми зеркалами, с апертурой $W = 100$ мкм и длиной резонатора $L = 2700$ мкм при разных температурах теплоотвода T , °C: 1 — 20, 2 — 70, 3 — 90, 4 — 110.

характеристики. При 110°C выходная оптическая мощность падает в 4 раза, а при температуре 130°C генерация срывается.

4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs были выращены лазерные гетероструктуры двух типов. Один тип имел волноводные и эмиттерные слои AlGaAs, а другой — AlGaAsP. Введение фосфора в волноводные и эмиттерные слои позволило уменьшить кривизну гетероструктуры за счет минимизации суммарных механических напряжений в ней. Из лазерной структуры, содержащей фосфор в волноводных и эмиттерных слоях, были изготовлены мезаполосковые лазерные диоды с апертурой 100 мкм, излучающие на длине волны 850 нм, и исследованы их излучательные характеристики.

Лазерные диоды со слоями из твердого раствора AlGaAsP, компенсирующими механические напряжения, имели внутренние оптические потери — 0.75 см^{-1} . Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме генерации составила 4.1 Вт на зеркало. Параметр характеристической температуры T_0 для диапазона температур 20–70°C составил величину 140 К, но при температурах 70–110°C снижался до 67 К. Сопоставляя полученные излучательные характеристики с данными, представленными в работе [2], можно предположить, что уменьшение кривизны гетероструктуры за счет введения в слои AlGaAs фосфора позволяет обеспечить лучший контакт с теплоотводом по всей длине лазерного диода, что улучшает отвод тепла при высоких токах накачки и, как следствие, позволяет увеличить выходную мощность.

Список литературы

- [1] K. Shighara, Y. Nagai, S. Karadida, A. Takami, Y. Kokubo, H. Matsufara, 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] N. Tansu, D. Zhou, L.J. Mawst. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **12** (6), 603 (2000).
- [4] W.E. Plano, J.S. Major, D.F. Welch. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **6** (4), 465 (1994).
- [5] А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, И.В. Яроцкая, В.А. Панарин, Г.Т. Микаелян. *Квант. электрон.*, **41** (1), 15 (2012).
- [6] 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. *ПЖТФ*, **31** (23), 1 (2005).
- [7] 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. *ПЖТФ*, **26** (6), 57 (2000).

- [8] 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. Беляков

850 nm diode lasers based on AlGaAsP/GaAs heterostructures

D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhin, S.O. Slipchenko, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov, L.S. Vavilova, I.S. Tarasov

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

Abstract Laser heterostructures with waveguide and cladding layers based on AlGaAs and AlGaAsP solid solutions were MOCVD grown on GaAs substrated and investigated. It is shown that heterostructure containing AlGaAsP layers possesses bigger radius of curvature than that of with AlGaAs layers. Ridge waveguide 100 μm -aperture diode lasers based on AlGaAsP/GaAs heterostructure were manufactured and investigated. Lasers had 0.75 cm^{-1} internal optical loss and $T_0 = 140 \text{ K}$ characteristic parameter measured in 20–70°C temperature range. Maximum optical output power reached 4.1 W per facet and continuous wave lasing remained up to 120°C heatsink temperature.