

Лазерные излучатели ($\lambda = 808$ нм) на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs

© А.А. Мармалюк[¶], А.Ю. Андреев, В.П. Коняев, М.А. Ладугин, Е.И. Лебедева, А.С. Мешков, А.Н. Морозюк, С.М. Сапожников, А.И. Данилов, В.А. Симаков, К.Ю. Телегин, И.В. Яроцкая

ОАО «НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха»
117342 Москва, Россия

(Получена 1 июня 2013 г. Принята к печати 16 июня 2013 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены лазерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs с различной геометрией активной области: с расширенным асимметричным и узким симметричным волноводами, различной глубиной квантовых ям. Из полученных образцов были изготовлены одиночные лазерные элементы, линейки и решетки лазерных диодов, и исследованы их выходные характеристики. Показано, что геометрия структуры с узким волноводом является более предпочтительной для линеек лазерных диодов ($\lambda = 808$ нм). Повышение барьера для носителей также благоприятно сказывается на выходных параметрах линеек в случае гетероструктур с узким симметричным волноводом, наклон ВтАХ для этих структур вырос с 0.9 Вт/А до 1.05 Вт/А. Решетка лазерных диодов 5×5 мм, собранная на основе лучшей гетероструктуры, продемонстрировала в квазинепрерывном режиме работы выходную мощность свыше 1500 Вт при токе накачки 150 А.

1. Введение

Широкий круг задач современной науки и техники находит свое решение с использованием твердотельных лазеров на основе YAG:Nd³⁺ (см., например, [1,2]). В последнее время ведущим способом накачки указанных лазеров является диодная накачка. Для своей реализации она требует создания линеек лазерных диодов (ЛЛД) с высокими требованиями по выходной мощности и температурной стабильности. Пути создания лазерных диодов (ЛД) с повышенной выходной мощностью хорошо известны. К основным из них можно отнести использование гетероструктур (ГС) с расширенными волноводами для снижения внутренних оптических потерь [3–6], увеличение энергетической глубины квантовых ям (КЯ) для уменьшения выброса носителей [7,8], повышение лучевой прочности зеркал [9,10], использование непоглощающих зеркал [11,12] и др. Вместе с тем близкое расположение излучающих областей в ЛЛД, особенно при высоком факторе заполнения, вносит свои коррективы в выбор оптимального варианта реализации конструкции гетероструктуры и активного элемента (кристалла). Существенным отличием ЛЛД от ЛД является более высокий уровень тепловыделения и конструктивные затруднения по отводу тепла, что приводит к повышению температуры лазерного кристалла даже в квазинепрерывном режиме работы, и, следовательно, к увеличению пороговой плотности тока и снижению дифференциальной квантовой эффективности [13–15]. Для сохранения выходных характеристик на заданном уровне в этих условиях излучатели должны обладать повышенной температурной стабильностью.

В данной работе рассмотрены подходы к созданию ЛЛД на основе ГС AlGaAs/GaAs, пригодных к созданию

на их основе мощных лазерных излучателей спектрального диапазона 805–810 нм.

2. Эксперимент

Изучены различные подходы к оптимизации геометрии ДГС-РО применительно к задаче создания ЛЛД, излучающих в районе 808 нм. Для этого методом МОС-гидридной эпитаксии были выращены пять лазерных ГС AlGaAs/GaAs двух типов: с узким симметричным и расширенным асимметричным волноводом. Дополнительно, в рамках каждого типа ГС, изменялась энергетическая глубина КЯ.

В первом типе ГС (образцы 1, 2) была использована геометрия с расширенным асимметричным волноводом общей толщиной ~ 1.5 мкм [16,17]. Помимо стандартного для лазерных ГС данного спектрального диапазона состава волноводного слоя Al_{0.32}Ga_{0.68}As (образец 1) были выращены ГС с увеличенной мольной долей AlAs до $x = 0.37$ в указанных слоях (образец 2). Соответственно была увеличена мольная доля AlAs в эмиттерных слоях ГС с сохранением Δx между волноводом и эмиттером для поддержания фактора оптического ограничения в активной области на одном уровне.

ГС второго типа (образцы 3–5) имели узкий симметричный волновод суммарной толщиной ~ 0.4 мкм, традиционный для создания ЛД спектрального диапазона 805–810 нм [18,19]. Образцы отличались составом волноводных слоев. Как и в ГС первого типа, помимо волноводного слоя Al_{0.32}Ga_{0.68}As (образец 3) были сформированы ГС с увеличенной мольной долей AlAs: Al_{0.37}Ga_{0.63}As (образец 4) и Al_{0.40}Ga_{0.60}As (образец 5).

Из полученных ГС были изготовлены лазерные элементы с шириной контакта $W = 80$ – 200 мкм и длиной резонатора $L = 1400$ – 3000 мкм. Коэффициенты отражения передней и задней граней резонатора с нанесен-

[¶] E-mail: almarm@mail.ru

ными оптическими покрытиями равнялись $R_1 \approx 0.05$ и $R_2 \approx 0.95$. Лазерные элементы монтировались на медный теплоотвод и собирались в линейки длиной 4 и 5 мм. На основе лучших ЛЛД были собраны решетки лазерных диодов (РЛД) с излучающей областью 5×5 мм. Измерения проводились в непрерывном режиме для дискретных ЛД и в квазинепрерывном режиме накачки (длительность импульсов 200 мкс, частота повторения — 20 Гц) для ЛЛД и РЛД.

3. Обсуждение результатов

Среди возможных путей повышения выходной мощности ЛД одним из самых перспективных является подход по использованию ГС с расширенным волноводом, в том числе на основе AlGaAs/GaAs для спектрального диапазона 805–810 нм [16,17]. На рис. 1 представлены типичные ватт-амперные характеристики (ВтАХ) таких ЛД с шириной мезаполоскового контакта 100 и 200 мкм, работающих в непрерывном режиме при стабилизации температуры теплоотвода.

При этом данные ЛД продемонстрировали достаточно надежную работу по результатам ресурсных испытаний (рис. 2). Снижение выходной мощности при фиксиро-

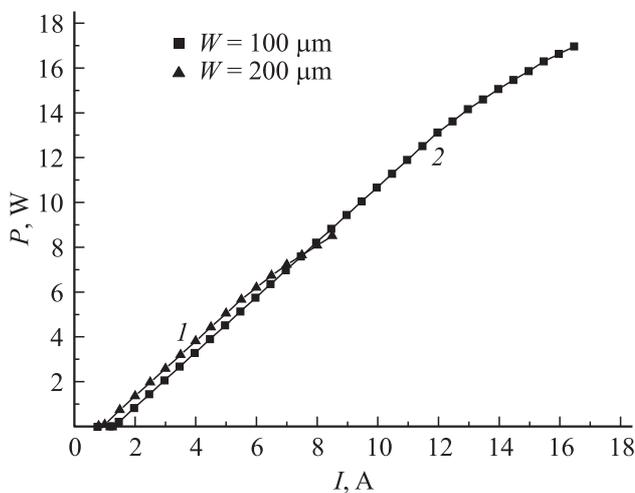


Рис. 1. Ватт-амперные характеристики ЛД с расширенным волноводом.

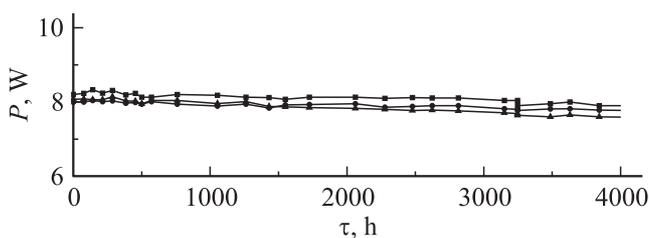


Рис. 2. Результаты ресурсных испытаний ЛД с расширенным волноводом в непрерывном режиме при температуре 40°C.

ванном токе накачки 8–9 А после 4000 ч работы в непрерывном режиме не превысило 4%.

Полученные результаты совпадают с данными других авторов [20] по созданию надежных приборов на основе ГС AlGaAs/GaAs, излучающих на длине волны 808 нм, с выходной мощностью на уровне 8–10 Вт. Вполне закономерно, что на первом этапе экспериментов ЛЛД были созданы на основе хорошо зарекомендовавших себя в непрерывном режиме ЛД. Изготовленные из ГС на основе расширенного волновода ЛЛД длиной 4 мм характеризовались пороговым током 17 А и наклоном ватт-амперной характеристики 1.06 Вт/А. Это позволило получить выходную мощность вплоть до 140 Вт на рабочем токе 150 А при поддержании температуры на уровне 25°C. Однако такие ЛЛД имели достаточно низкие значения характеристической температуры (см. таблицу), что приводило к высокой температурной чувствительности порогового тока и, как следствие, ограничивало максимальную мощность. Так, переход от комнатной температуры к 65°C повлек за собой снижение выходной мощности ЛЛД на 40% при том же рабочем токе. В [8] указывается, что эффективным путем повышения температурной стабильности ЛД является увеличение энергетической глубины КЯ. Этот подход был успешно применен в ГС для ЛД с длиной волны излучения $\lambda = 1010$ –1070 нм. Авторами показано, что делокализация электронов из КЯ в волноводные слои снижается благодаря использованию КЯ с большой энергетической глубиной. Это замедляет рост порогового тока и внутренних оптических потерь и, как следствие, падение квантовой эффективности при повышенных температурах. В данной работе предпринята попытка развития данного подхода применительно к ГС на основе AlGaAs/GaAs, обеспечивающих лазерную генерацию с длиной волны излучения $\lambda = 808$ нм. Энергетическая глубина КЯ изменялась посредством использования барьерных слоев с различной шириной запрещенной зоны. В выбранной системе материалов такая вариация ширины запрещенной зоны подразумевает изменение состава твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$. При этом важно рассматривать различные последствия изменения состава волноводных слоев. С одной стороны, увеличение высоты барьера для носителей способствует удержанию электронов в КЯ и, следовательно, увеличению дифференциальной эффективности и повышению характеристической температуры. С другой стороны, повышение мольной доли AlAs в барьере AlGaAs, требуемое для указанного увеличения глубины КЯ, неизбежно сопряжено с повышенным внедрением атомов кислорода в волноводные слои в процессе роста [21,22]. Примесные атомы кислорода выступают в качестве центров безызлучательной рекомбинации, что приводит к снижению внутреннего квантового выхода, перегреву активной области и падению выходной мощности лазерных излучателей [23,24]. Действительно, образец 2, с увеличенной глубиной КЯ и расширенным волноводом, продемонстрировал ожидаемое повышение

Выходные характеристики исследованных ЛЛД длиной 4 мм в квазинепрерывном режиме работы ($\tau = 200$ мкс, $\nu = 20$ Гц)

Наименование образца	Ширина волновода, мкм	Материал волновода	Пороговый ток, А	Наклон ВтАХ, Вт/А	Характеристическая температура, К
Образец 1	1.5	$Al_{0.32}Ga_{0.68}As$	17	1.06	100–105
Образец 2	1.5	$Al_{0.37}Ga_{0.63}As$	17	0.96	105–110
Образец 3	0.4	$Al_{0.32}Ga_{0.68}As$	12	0.9	95–100
Образец 4	0.4	$Al_{0.37}Ga_{0.63}As$	11.5	0.96	105–110
Образец 5	0.4	$Al_{0.40}Ga_{0.60}As$	10	1.05	115–120

характеристической температуры (см. таблицу). Однако повышения выходной мощности при этом не произошло, так как снизилась дифференциальная эффективность исследуемой ЛЛД. Известно, что с увеличением мольной доли AlAs в твердых растворах AlGaAs качество последних снижается в первую очередь из-за увеличения вхождения кислорода в растущий слой и образования связанных с ним глубоких уровней [21,22]. Более того, указанные твердые растворы с повышенной мольной долей AlAs склонны к быстрому окислению при формировании зеркал резонатора лазерного кристалла [25]. Видимо, в такой конструкции ГС с расширенными волноводными слоями указанное отрицательное воздействие становится особенно заметным. Ввиду выявленной тенденции рост ГС в геометрии с расширенным волноводом и более широкозонными волноводными слоями ($Al_{0.40}Ga_{0.60}As$) не проводился. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что подход по снижению внутренних оптических потерь путем расширения волноводных слоев является эффективным инструментом повышения выходной мощности дискретных ЛД, как правило, работающих при высоких рабочих токах в условиях хорошего теплоотвода и стабилизации температуры. В рассматриваемом же случае ЛЛД, когда рабочие токи отдельного излучателя заметно ниже и из-за близкого расположения излучающих областей тепловыделение существенно выше, а теплоотвод существенно затруднен, ЛЛД на основе расширенных волноводов не могут продемонстрировать свои преимущества. По-видимому, в этой ситуации можно предположить, что более действенной конструкцией ГС для данного применения является геометрия с узким волноводом и глубокой КЯ.

Для проверки указанного предположения проведена серия экспериментов по исследованию ЛЛД с узким волноводом и с постепенным увеличением энергетической глубины КЯ (образцы 3–5). Значения пороговых токов для всех образцов данного типа находились в диапазоне 10–12 А, что закономерно ниже, чем для аналогичных величин образцов с расширенным волноводом. При этом повышение барьерного слоя КЯ благоприятно сказалось на наклоне кривой ВтАХ, последний заметно вырос (см. таблицу). Характеристическая температура также продемонстрировала тенденцию к увеличению. Исследования в диапазоне температур показали сни-

жение выходной мощности лучшей ЛЛД (образец 5) только на 15% при повышении температуры с 25 до 60°C при фиксированном токе накачки. Максимальная выходная мощность таких ЛЛД достигала 200 Вт в квазинепрерывном режиме. Данный результат превышает аналогичные величины, полученные для ЛЛД на основе ГС с расширенным волноводом. Сравнение ВтАХ ЛЛД с расширенным (образец 1) и узким (образец 5) волноводами представлено на рис. 3

Лучшие по результатам данного исследования ЛЛД (образец 5) были собраны в решетку с излучающей областью 5×5 мм. ВтАХ данной ЛЛД представлена на рис. 4. Выходная мощность 1500 Вт в квазинепрерывном режиме достигнута при токе накачки 150 А. При указанной мощности отклонение от линейности ВтАХ составило $\sim 17\%$.

Залогом эффективной работы ЛЛД и РЛД на их основе является повышенная температурная стабильность отдельных излучающих элементов. В этой связи перспективным для данного практического приложения представляется развитие направления по использованию ГС с узким симметричным волноводом [18,19]. Более низкие пороговые токи, последовательное и тепловое сопротивление, присущие ЛД с узким волноводом по срав-

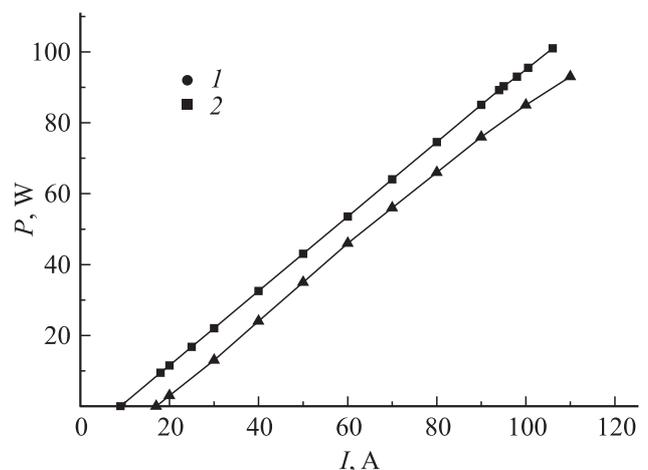


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики ЛЛД в квазинепрерывном режиме работы ($\tau = 200$ мкс, $\nu = 20$ Гц): 1 — на основе ГС с узким волноводом, 2 — на основе ГС с расширенным волноводом.

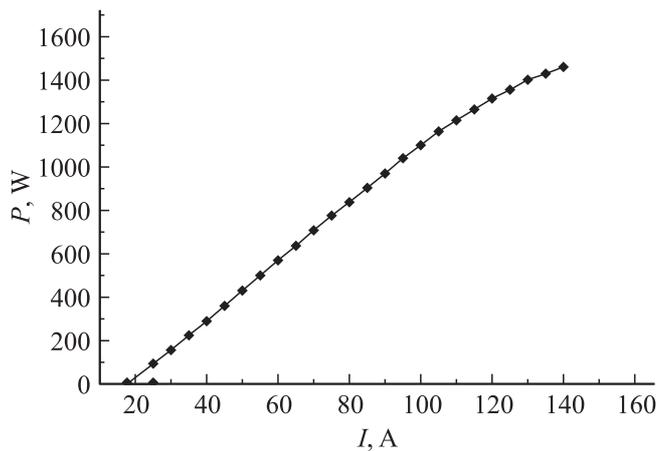


Рис. 4. Ватт-амперная характеристика РЛД с излучающей областью 5×5 мм в квазинепрерывном режиме работы ($\tau = 200$ мкс, $\nu = 20$ Гц) на основе ГС с узким волноводом.

нению с ЛД с расширенным волноводом, оказываются значимыми при использовании в составе мощных РЛД.

Сравнение ЛЛД различных типов с одинаковой глубиной КЯ (образцы 1 и 3) позволяет заключить, что при прочих равных условиях геометрия ГС с расширенным волноводом позволяет добиться более высоких результатов при комнатной температуре. Однако специфика применения ЛЛД в составе мощных РЛД неизбежно сталкивается с повышением рабочей температуры даже в условиях принудительного охлаждения. Это требует повышения температурной стабильности ЛЛД, что в рамках развиваемого подхода по увеличению энергетической глубины КЯ AlGaAs/AlGaAs оказывается реализуемым на основе геометрии с узким волноводом с учетом технологических особенностей формирования ГС. Оптимизация технологии получения ГС AlGaAs/GaAs с пониженным содержанием фонового уровня кислорода или переход к ГС, не содержащим алюминий, в активной области могут изменить приоритеты в выборе оптимальной конструкции ГС для РЛД, излучающих в районе 808 нм.

Повышение температурной стабильности ЛЛД открывает перспективы создания лазерных излучателей для накачки твердотельных лазеров на основе YAG:Nd, не требующих принудительного охлаждения.

4. Заключение

Рассмотрены пути повышения температурной стабильности ЛЛД, пригодных для накачки твердотельных лазеров на основе YAG:Nd. Показано, что при существующем уровне технологии наиболее целесообразным представляется конструкция лазерных ГС на основе AlGaAs/GaAs с узким волноводом. Повышение барьера для носителей благоприятно сказывается на выходных параметрах ЛЛД в случае ГС с узким симметричным волноводом, наклон ВтАХ для этих структур вырос

с 0.9 до 1.05 Вт/А. ЛЛД оптимальной геометрии длиной 4 мм показала максимальную мощность до 200 Вт. РЛД на основе лучших ЛЛД с излучающей областью 5×5 мм продемонстрировала в квазинепрерывном режиме выходную мощность свыше 1500 Вт при токе накачки 150 А.

Список литературы

- [1] Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шокин. *Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом* (М., Радио и связь, 1985).
- [2] В.И. Дудкин, Л.Н. Пахомов. *Квантовая электроника. Приборы и их применение* (М., Техносфера, 2006).
- [3] L.J. Mawst, A. Bhattacharya, J. Lopez, D. Botez, D.Z. Garbuzov, L. Demarko, I.C. Connolly, M. Jansen, F. Fang, R.F. Nabiev. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1532 (1996).
- [4] В.И. Швейкин, В.А. Геловани. *Квант. электрон.*, **32**, 683 (2002).
- [5] П.В. Булаев, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Д.Б. Никитин, Д.Н. Николаев, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, А.Д. Бондарев, И.Д. Залевский, И.С. Тарасов. *ФТП*, **36**, 1144 (2002).
- [6] 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. Фетицова, И.С. Тарасов. *ФТП*, **39**, 388 (2005).
- [7] И.С. Шашкин, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Д.А. Веселов, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. *ФТП*, **46**, 1230 (2012).
- [8] И.С. Шашкин, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Н.А. Рудова, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Д.А. Веселов, К.В. Бахвалов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **46**, 1234 (2012).
- [9] P. Ressel, G. Erbert, U. Zeimer, K. Hausler, G. Beister, V. Sumpf, A. Klehr, G. Trankle. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **17**, 962 (2005).
- [10] R. Lambert, T. Ayling, A. Hendry, J. Carson, D. Barrow, S. Mc Hendry, C. Scott, A. Mc Kee, W. Meredith. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 956 (2006).
- [11] C.L. Walker, A.C. Bryce, J.H. Marsh. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **14**, 1394 (2002).
- [12] В.С. Qiu, O. Kowalski, S.D. Mc Dougall, X.F. Liu, J.H. Marsh. *Proc. SPIE*, **6909**, 69090S1 (2008).
- [13] С.Ю. Карпов, П.С. Копьёв, А.Л. Тер-Мартirosян, В.П. Чалый, А.П. Шкурко. *ФТП*, **25**, 1361 (1991).
- [14] В.В. Безотосный, Х.Х. Кумыков, Н.В. Маркова. *Квант. электрон.*, **24**, 495 (1997).
- [15] Г.Т. Микаелян. *Квант. электрон.*, **36**, 222 (2006).
- [16] 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**, 628 (2006).
- [17] А.Ю. Андреев, С.А. Зорина, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.В. Мурашова, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, К.Ю. Телегин, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **43**, 543 (2009).

- [18] В.В. Безотосный, Ю.П. Коваль, Н.В. Маркова, Ю.М. Попов, М.Н. Грудень, В.И. Швейкин. Квант. электрон., **22**, 101 (1995).
- [19] А.Ю. Абазадзе, В.В. Безотосный, Т.Г. Гурьева, Е.И. Давыдова, И.Д. Залевский, Г.М. Зверев, А.В. Лобинцов, А.А. Мармалюк, С.М. Сапожников, В.А. Симаков, М.Б. Успенский, В.А. Шишкин. Квант. электрон., **31**, 659 (2001).
- [20] В.В. Безотосный, В.Ю. Бондарев, О.Н. Крохин, Г.Т. Микаелян, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев. Квант. электрон., **39**, 241 (2009).
- [21] N. Chand, T.D. Harris, S.N.G. Chu, E.E. Becker, A.M. Sergent, M. Schnoes, D.V. Lang. J. Cryst. Growth., **111**, 20 (1993).
- [22] N. Chand, S.N.G. Chu, N.K. Dutta, J. Lopata, M. Geva, A.V. Syrbu, A.Z. Mereutza, V.P. Yakovlev. IEEE J. Quant. Electron., **30**, 424 (1994).
- [23] Y. Mihashi, M. Miyashita, N. Kaneno, M. Tsugami, N. Fujii, S. Takamiya, S. Mitsui. J. Cryst. Growth, **141**, 22 (1994).
- [24] Ж.И. Алфёров, Н.И. Кацавец, В.Д. Петриков, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин. ФТП, **30**, 474 (1996).
- [25] W.C. Tsang, H.J. Rosen, P. Vettiger, D.J. Webb. Appl. Phys. Lett., **59**, 1005 (1991).

Редактор Т.А. Полянская

Laser emitters ($\lambda = 808$ nm) based on AlGaAs/GaAs heterostructures

A.A. Marmalyuk, A.Y. Andreev, V.P. Konyaev, M.A. Ladugin, E.I. Lebedeva, A.S. Meshkov, A.M. Morozyuk, S.M. Sapozhnikov, A.I. Danilov, V.A. Simakov, K.Y. Telegin, I.V. Yarotskaya

Polyus R&D Institute
117342 Moscow, Russia

Abstract Laser heterostructures with various geometry of active region in AlGaAs/GaAs material system were grown by MOCVD. Single laser diodes, laser bars and laser arrays were created and their output characteristics were studied. Active region geometry with narrow waveguide shown to be more preferable for laser diode bars ($\lambda = 808$ nm). Increase of the barrier for carriers improve laser bars output from 0.9 to 1.05 W/A. Laser array 5×5 mm made from the best heterostructure demonstrated optical power more than 1500 W on current 150 A in QCW mode.