

Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 835 нм на основе различных типов лазерных гетероструктур

© А.В. Мурашова[¶], Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, В.В. Васильева, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов, Y.S. Kim*, D.H. Kang*, C.Y. Lee*

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

* Samsung Electro-Mechanics Co., LTD, 443-743 Suwon-City, Republic of Korea

(Получена 19 ноября 2007 г. Принята к печати 30 ноября 2007 г.)

Проведено сравнение оптических и электрических характеристик мощных многомоновых лазерных диодов с длиной волны излучения 835 нм, полученных на основе трех систем твердых растворов: AlGaAs/GaAs, AlGaAs/GaAsP и (Al)GaInP/GaInAsP. Выходная непрерывная оптическая мощность 5 Вт достигнута в лазерах с шириной полоска 80 мкм независимо от выбранной материальной системы. Наибольшая максимальная оптическая мощность 7 Вт достигнута в лазерах на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP.

PACS: 42.55.Px, 42.70.Hj

1. Введение

Одной из последних тенденций при создании мониторов проекционного телевидения является использование мощных полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 835 нм. Реализация данной идеи предполагает наличие лазерных диодов с максимальной выходной непрерывной мощностью излучения не менее 5 Вт и высоким коэффициентом полезного действия (кпд). В настоящей статье описан подход к разработке таких лазерных диодов и представлены результаты, полученные в процессе их исследования.

При разработке мощного многомонового лазерного диода с длиной волны излучения 835 нм использовались три системы: AlGaAs/GaAs, AlGaAs/GaAsP и (Al)GaInP/GaInAsP. Для каждой из систем были разработаны тип лазерной гетероструктуры, технология выращивания и технология постростовой обработки лазерной гетероструктуры, а также изготовлены тестовые образцы лазерных диодов с широким (80 мкм) полоском и измерены их выходные электрические и оптические параметры. На основе полученных результатов дано сравнение используемых материальных систем с точки зрения преимуществ и недостатков для изготовления мощных лазеров, излучающих на длине волны 835 нм.

2. Лазерная гетероструктура

2.1. Системы AlGaAs/GaAs и AlGaAs/GaAsP

Конструкция и технология получения лазеров в системах AlGaAs/GaAs и AlGaAs/GaAsP во многом схожи, поскольку лазерные гетероструктуры различаются только активной областью.

При разработке лазерной гетероструктуры в качестве базовой конструкции была выбрана двойная гетероструктура

раздельного ограничения (РО ДГС), включающая в себя: эмиттеры $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$, волноводы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, активную область — квантовую яму (КЯ) GaAs или растянуто-напряженную КЯ GaAsP.

Состав волноводных слоев был выбран именно таким для того, чтобы разность между шириной запрещенной зоны волновода и шириной запрещенной зоны активной области составила ~ 300 мэВ с учетом квантования. Это обеспечивает эффективный захват электронов в активной области и предотвращает термический выброс носителей из активной области в волновод.

При выбранном составе слоев эмиттеров различие в показателях преломления волноводного и эмиттерного слоев ($\Delta n = 0.096$) позволяет получить хороший волноводный эффект в лазерной гетероструктуре.

Для описанной лазерной гетероструктуры вычислялись толщина слоя GaAs (в первой системе) или состав слоя $GaAs_yP_{1-y}$ толщиной 100 \AA (во второй системе), обеспечивающие длину волны излучения 835 нм. Уровни квантования рассчитывались по формулам, приведенным в [1]. Данные по разрывам зон для ненапряженных материалов были взяты из [2], а влияние напряжений на положение энергетических уровней учитывалось в соответствии с [3]. В результате было определено, что длина волны излучения в описанной гетероструктуре должна быть равна 835 нм, если толщина активной области GaAs составляет 67 \AA и (во втором случае) если активная область $GaAs_yP_{1-y}$ при толщине 100 \AA имеет состав с $y = 0.97$.

Дальнейшая разработка лазерной гетероструктуры — определение толщины волновода и положения в нем активной области — была направлена на минимизацию внутренних оптических потерь с целью увеличения максимальной мощности оптического излучения. Основным приемом для снижения внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах раздельного ограничения является увеличение толщины волновода лазерной гете-

[¶] E-mail: a.murashova@mail.ioffe.ru

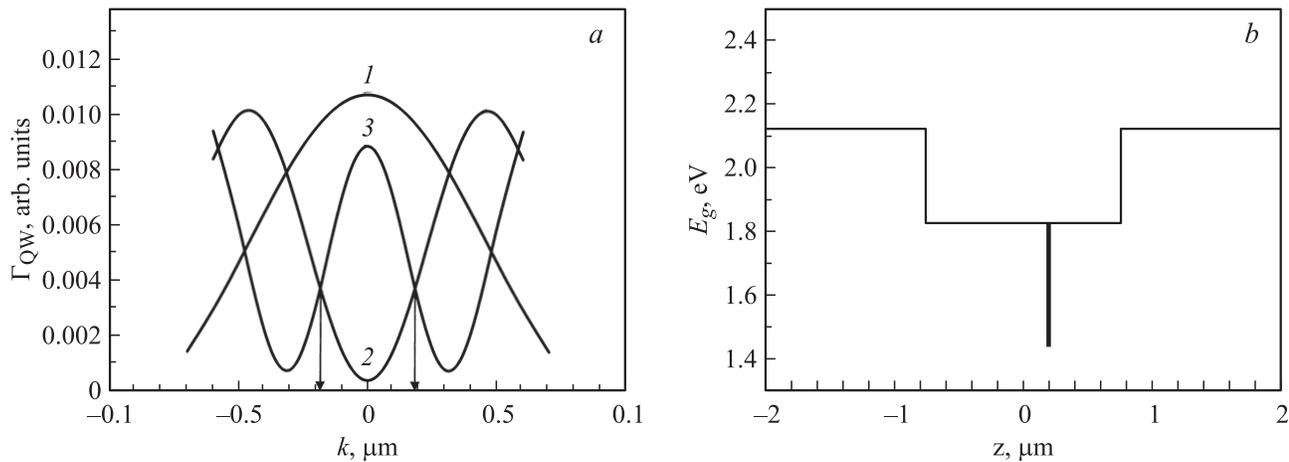


Рис. 1. Лазерная гетероструктура в системе AlGaAs/GaAs или AlGaAs/GaAsP, состоящая из эмиттеров $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ($E_g = 2.122$ эВ), волновода $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ($E_g = 1.83$ эВ) толщиной 1.5 мкм и активной области, излучающей на длине волны 835 нм. *a* — факторы оптического ограничения активной области (Γ_{QW}) в зависимости от ее положения в волноводе (k) для фундаментальной (1), первой (2) и второй (3) мод; k — расстояние, на которое активная область смещена относительно центра волновода; стрелками указаны положения активной области с $\Gamma_{QW_0}/\Gamma_{QW_N} = \max$. *b* — энергетическая зонная диаграмма; направление z перпендикулярно слоям структуры.

рооструктуры. Однако в симметричной лазерной гетероструктуре увеличение толщины волновода существенно ограничено условием возникновения мод высших порядков, поскольку эти моды значительно проникают в сильно легированные эмиттерные слои и эффективно поглощаются в них. Таким образом, возникновение мод высших порядков ведет к увеличению потерь и снижению оптической мощности лазера. Для подавления мод высших порядков нами использовалась асимметричная гетероструктура, в которой активная область сдвинута относительно центра волновода в ту точку, где фактор оптического ограничения активной области для фундаментальной моды (Γ_{QW_0}) максимален по сравнению с факторами оптического ограничения для мод высших порядков (Γ_{QW_N} , N — номер моды) [4–7]. В этом случае генерация фундаментальной моды будет предпочтительнее. Выполнив вычисления для выбранной лазерной гетероструктуры, мы определили, что при толщине волновода 1.5 мкм активная область должна быть сдвинута от центра волновода в сторону p -эмиттера на 0.19 мкм. Вычисления проводились на основе распределения стационарных электромагнитных полей в асимметричной РО ДГС. На рис. 1, *a* и *b* представлены результаты вычислений факторов оптического ограничения мод (Γ_{QW}) и распределение ширины запрещенной зоны E_g в лазерной гетероструктуре в системе AlGaAs/GaAs или AlGaAs/GaAsP.

2.2. Система (Al)GaInP/GaInAsP

При разработке лазерной гетероструктуры в качестве базовой конструкции была выбрана РО ДГС, включающая в себя: эмиттеры $(\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$, волноводы

$\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$, активную область — ненапряженную квантовую яму $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$.

Учитывая эффект квантования, мы определили, что длину волны излучения 835 нм можно получить, используя ненапряженную КЯ $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ толщиной 100 Å.

Разность между шириной запрещенной зоны волновода и шириной запрещенной зоны активной области составила ~ 400 мэВ с учетом квантования. Это обеспечивает эффективный захват электронов в активной области и предотвращает термический выброс носителей из активной области в волновод.

Далее, по аналогии с двумя предыдущими материальными системами определялись толщина волновода и положение в нем активной области, с тем чтобы снизить внутренние оптические потери. Выполнив вычисления, мы определили, что в лазерной гетероструктуре $(\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ с толщиной волновода 2.3 мкм активная область должна быть сдвинута от центра волновода в сторону p -эмиттера на 0.29 мкм (рис. 2, *a* и *b*).

3. Экспериментальные образцы

Выращивание лазерных гетероструктур осуществлялось методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на установке „EMCORE GS 3100“ с вертикальным реактором. Суммарная скорость потока H_2 составляла 10 л/мин, давление в реакторе 77 Торр, скорость вращения подложкодержателя 1000 об/мин. Температура роста составляла 750°C для систем AlGaAs/GaAs, AlGaAs/GaAsP и 725°C для системы (Al)GaInP/GaInAsP. В качестве источников элементов

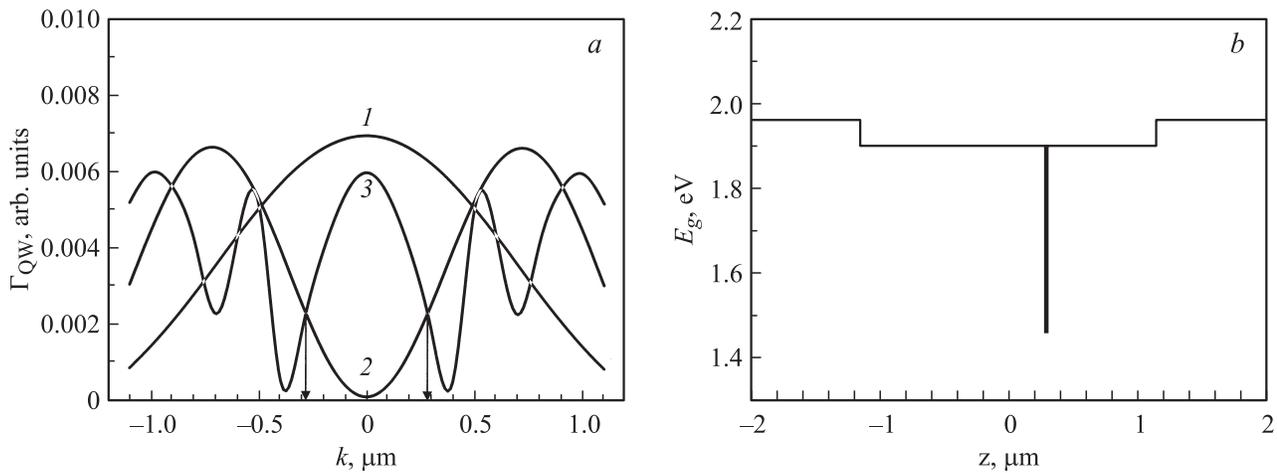


Рис. 2. Лазерная гетероструктура в системе (Al)GaInP/GaInAsP, состоящая из эмиттеров $(Al_{0.10}Ga_{0.90})_{0.51}In_{0.49}P$ ($E_g = 1.96$ эВ), волновода $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ ($E_g = 1.9$ эВ) толщиной 2.3 мкм и активной области, излучающей на длине волны 835 нм. *a* — факторы оптического ограничения активной области (Γ_{QW}) в зависимости от ее положения в волноводе (k) для фундаментальной (1), первой (2) и второй (3) мод; k — расстояние, на которое активная область смещена относительно центра волновода; стрелками указаны положения активной области с $\Gamma_{QW_0}/\Gamma_{QW_N} = \max$. *b* — энергетическая зонная диаграмма; направление z перпендикулярно слоям структуры.

III группы использовались триметилгаллий (TMGa), триметилиндий (TMIn), триметилалюминий (TMAI), а в качестве источников элементов V группы использовались 100%-й арсин (AsH_3) и 100%-й фосфин (PH_3). Бисциклопентадиенил магния (Cp_2Mg) и 0.05% моносилана (SiH_4) в водороде использовались в качестве источников

акцепторных и донорных легирующих примесей соответственно. Некоторые газовые каналы были сдвоены с целью получения максимально резких гетеропереходов при смене газовой фазы в реакторе.

В табл. 1 и 2 дано подробное описание выращенных лазерных гетероструктур. Лазерные гетероструктуры в

Таблица 1. Асимметричная РО ДГС в системе AlGaAs/GaAs или AlGaAs/GaAsP

№	Слой	Состав	Уровень легирования, $см^{-3}$	Толщина
1	<i>n</i> -подложка	GaAs (001)	$5 \cdot 10^{18}$	350–400 мкм
2	<i>n</i> -эмиттер	$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	$1 \cdot 10^{18}$ (Si)	2 мкм
3	волновод	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	Не легирован	0.94 мкм
4	активная область (КЯ)	GaAs или $GaAs_{0.97}P_{0.03}$	» »	67 Å 100 Å
5	волновод	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	» »	0.56 мкм
6	<i>p</i> -эмиттер	$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	$3 \cdot 10^{18}$ (Mg)	1.5 мкм
7	контактный <i>p</i> -слой	GaAs	$5 \cdot 10^{18}$ (Mg)	0.25 мкм

Таблица 2. Асимметричная РО ДГС в системе (Al)GaInP/GaInAsP

№	Слой	Состав	Уровень легирования, $см^{-3}$	Толщина
1	<i>n</i> -подложка	GaAs (001)	$5 \cdot 10^{18}$	350–400 мкм
2	<i>n</i> -эмиттер	$(Al_{0.10}Ga_{0.90})_{0.51}In_{0.49}P$	$1 \cdot 10^{18}$ (Si)	2 мкм
3	волновод	$Ga_{0.51}In_{0.49}P$	Не легирован	1.44 мкм
4	спейсер	$Ga_{0.93}In_{0.07}As_{0.5}P_{0.5}$	» »	20 Å
5	активная область (КЯ)	$Ga_{0.96}In_{0.04}As_{0.92}P_{0.08}$	» »	100 Å
6	спейсер	$Ga_{0.93}In_{0.07}As_{0.5}P_{0.5}$	» »	20 Å
7	волновод	$Ga_{0.51}In_{0.49}P$	» »	0.86 мкм
8	<i>p</i> -эмиттер	$(Al_{0.10}Ga_{0.90})_{0.51}In_{0.49}P$	$3 \cdot 10^{18}$ (Mg)	1.5 мкм
9	контактный <i>p</i> -слой	GaAs	$5 \cdot 10^{18}$ (Mg)	0.25 мкм

системе (Al)GaInP/GaInAsP имели тонкие напряженные спейсерные слои, которые использовались для повышения кристаллографического и оптического качества гетерограниц GaInP/GaInAsP.

Методами стандартной фотолитографии с использованием химического травления на выращенных лазерных гетероструктурах формировались мезаполоски шириной 80 мкм. Сплав Au+Zn(28%) использовался для создания контакта к *p*-стороне структуры, а Au+Ge(10%) — к *n*-стороне. На пассивных областях в качестве диэлектрика был использован SiO₂.

Затем структуры раскалывались на отдельные кристаллы, длины резонатора составляли $L = 1-4$ мм. Кристаллы напайвались *p*-стороной вниз на медный теплоотвод с использованием In-припоя. Далее методом магнетронного напыления на переднюю и заднюю грани кристалла лазерного диода наносились соответственно просветляющее (SiO₂, отражение 5%) и многослойное высокоотражающее (SiO₂/Si, отражение 95%) покрытия.

4. Экспериментальные результаты

Основные параметры, характеризующие гетероструктуру, — пороговая плотность тока, внутренний квантовый выход, внутренние оптические потери — измерялись на серии естественно сколотых образцов с разными длинами резонатора.

Основные электрические и оптические характеристики образцов — вольт-амперные, ватт-амперные характеристики, КПД (рис. 3, 4), расходимость луча и спектры излучения (рис. 5) — измерялись на образцах с напыленными зеркалами. Ватт-амперные характеристики измерялись в непрерывном режиме (CW) при комнатной температуре (25°C) до максимальной выходной мощности. Все остальные выходные параметры измерялись на

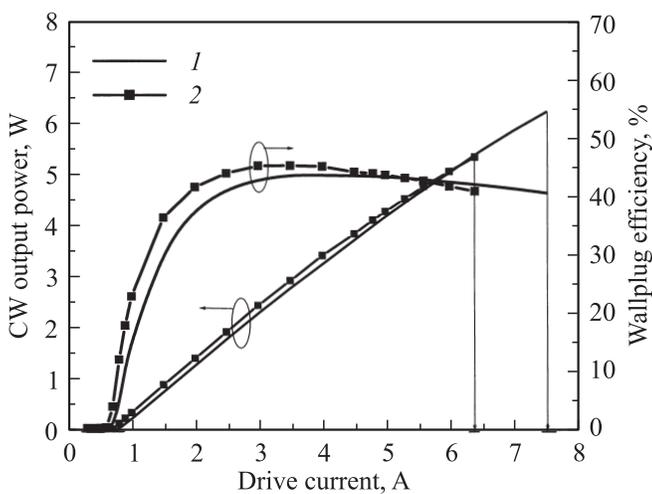


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики и зависимости КПД от тока накачки в непрерывном режиме генерации для лазеров с длиной резонатора 3 мм на основе систем AlGaAs/GaAs (1) и AlGaAs/GaAsP (2).

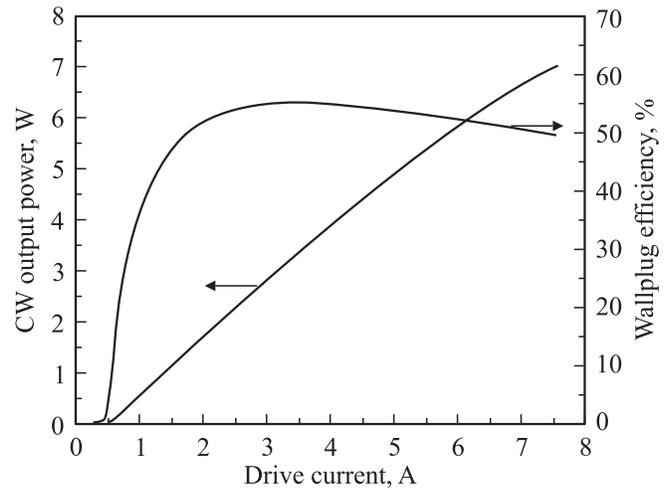


Рис. 4. Ватт-амперная характеристика и зависимость КПД от тока накачки в непрерывном режиме генерации для лазера с длиной резонатора 3 мм на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP.

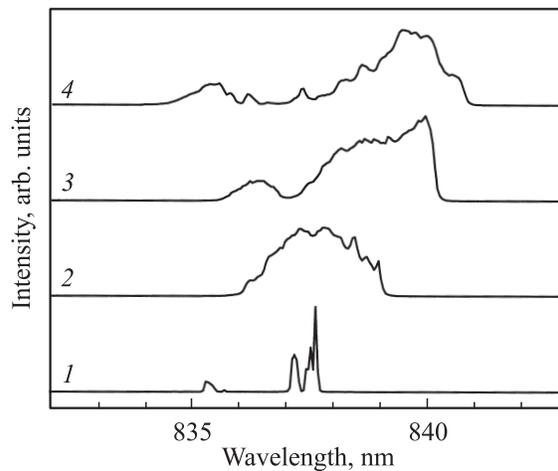


Рис. 5. Типичный спектр излучения лазерного диода на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP в непрерывном режиме генерации при значениях рабочей мощности P_{op} , Вт: 1 — 0,05, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3.

непрерывной рабочей мощности до 3 Вт при комнатной температуре. Также проводились исследования КПД, ватт-амперных и вольт-амперных характеристик в диапазоне температур 25–55°C. Из этих измерений определялись коэффициенты температурной чувствительности пороговой плотности тока и дифференциальной эффективности.

Основные параметры лазерных диодов на основе трех выбранных материальных систем суммированы в табл. 3. Значения приведены для лазеров с длиной резонатора 3 мм. Как видно из табл. 3, лазерные диоды на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP обладают лучшими параметрами, чем лазерные диоды на основе систем AlGaAs/GaAs и AlGaAs/GaAsP. Особое внимание следует обратить на более чем двукратное увеличение

Таблица 3. Параметры лазерных диодов на основе трех систем

Параметр		AlGaAs/GaAs	AlGaAs/GaAsP	(Al)GaInP/GaInAsP
Пороговая плотность тока при бесконечной длине резонатора	$J_0, \text{A/cm}^2$	170	160	150
Внутренний квантовый выход	$\eta_i, \%$	99	98	99
Внутренние оптические потери	α_i, cm^{-1}	1.0	1.2	0.8
Максимальная выходная оптическая мощность	$P_{\text{max}}, \text{Вт}$	6.3	5.4	7.0
кпд*	$\eta_c, \%$	44	45	55
Расходимость излучения в горизонтальной плоскости*	$\theta_{\parallel}, \text{град}$	9	9	5
Расходимость излучения в вертикальной плоскости*	$\theta_{\perp}, \text{град}$	29	33	21
Коэффициент температурной чувствительности порогового тока	$T_0, \text{К}$	80	75	170
Коэффициент температурной чувствительности дифференциальной эффективности	$T_1, \text{К}$	200	180	420

Примечание. * — измерения проводились на рабочей мощности 3 Вт.

коэффициентов температурной чувствительности порогового тока и дифференциальной эффективности в таких лазерных диодах. Это, в частности, приводит к сохранению линейности ватт-амперной характеристики при больших токах накачки и, как следствие, к увеличению кпд прибора.

Также в лазерах на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP не было обнаружено катастрофической оптической деградации зеркал, характерной для двух других систем. В данном случае оптическая мощность была ограничена катастрофической оптической деградацией лазера или термическим насыщением. Этот результат был ожидаем, поскольку известно, что зеркала SiO₂/Si в лазерах, содержащих алюминий в активном и волноводном слоях, перегреваются на порядок сильнее, чем в лазерах, не содержащих алюминия [8]. Однако сравнение значений плотности оптической мощности на зеркалах лазеров при их деградации показало следующее. Катастрофическая оптическая деградация зеркал в лазерах на основе систем AlGaAs/GaAs и AlGaAs/GaAsP происходила соответственно при 8.5 и 7.3 МВт/см², катастрофическая оптическая деградация лазеров на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP происходила при 6.1 МВт/см². Таким образом, в лазерах на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP деградации зеркал не наблюдалось прежде всего из-за снижения плотности оптической мощности на зеркале резонатора за счет большего расширения волновода.

5. Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что мощный многомодовый лазер с длиной волны излучения 835 нм и максимальной выходной непрерывной

мощностью излучения не менее 5 Вт может быть создан с использованием любой из трех выбранных материальных систем. Однако наилучшие параметры были достигнуты в лазерных диодах на основе системы (Al)GaInP/GaInAsP. Проводя сравнение трех материальных систем в рамках поставленной в настоящей работе задачи, можно сказать следующее.

Системы AlGaAs/GaAs и AlGaAs/GaAsP более просты по сравнению с системой (Al)GaInP/GaInAsP с точки зрения технологии выращивания лазерной гетероструктуры, поскольку твердые растворы AlGaAs согласованы по параметру решетки с GaAs во всем диапазоне составов. Это значительно упрощает подбор и оптимизацию технологических режимов для получения резких гетеропереходов в этих двух системах. Тем не менее наличие Al в волноводных слоях приводит к катастрофической оптической деградации зеркал, что не позволяет существенно превысить 5 Вт при исследовании максимальной выходной непрерывной мощности излучения лазеров на основе этих систем. Поэтому дополнительные шаги, направленные на увеличение мощности таких лазеров, должны заключаться именно в усовершенствовании технологии формирования зеркал.

Система (Al)GaInP/GaInAsP является более сложной в плане выращивания лазерных гетероструктур высокого кристаллографического и оптического качества, что естественно при переходе к использованию четверных твердых растворов. Однако дизайн лазерной гетероструктуры в этой системе оказался более выигрышным благодаря более широкому волноводу, что обуславливает более низкую плотность оптической мощности на зеркалах лазеров и существенно снижает вероятность катастрофической оптической деградации зеркал. Основные причины, ограничивающие мощность лазеров на основе этой системы, — катастрофическая оптическая

деградация и термическое насыщение — говорят о том, что следует повышать кристаллографическое качество слоев и гетерограниц лазерной структуры и усовершенствовать саму структуру. Тем не менее, несмотря на упомянутые недостатки системы (Al)GaInP/GaInAsP, наилучшие значения параметров были достигнуты в лазерах на ее основе. То обстоятельство, что в волноводных слоях лазеров на основе этой системы не содержится Al, является положительным моментом для увеличения срока службы лазерных диодов при использовании покрытий SiO₂/Si, так как имеется некоторый запас прочности по отношению к катастрофической оптической деградации зеркала.

Принимая во внимание полученные результаты, можно заключить, что при использовании описанных в данной работе ростовых и постростовых технологий более предпочтительной для создания мощных лазеров является система (Al)GaInP/GaInAsP.

Список литературы

- [1] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщев, И.Н. Арсентьев, А.Д. Бондарев, М.К. Трукан, И.С. Тарасов. ФТП, **41** (10), 1247 (2007).
- [2] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89** (11), 5815 (2001).
- [3] M.P.C.M. Krijn. Semicond. Sci. Technol., **6**, 27 (1991).
- [4] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38** (12), 1477 (2004).
- [5] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. Lett., **40**, 1413 (2004).
- [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. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **39** (3), 388 (2005).
- [7] 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. Симмаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. ФТП, **40** (5), 628 (2006).
- [8] Ж.И. Алфёров, Н.И. Кацавец, В.Д. Петриков, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин. ФТП, **30** (3), 474 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

High power 835 nm laser diodes based on different types of heterostructures

A.V. Murashova, D.A. Vinokurov, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, V.V. Shamakhov, V.V. Vasilyeva, V.A. Kapitonov, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, T.A. Nalet, A.L. Stankevich, N.V. Fetisova, I.S. Tarasov, Y.S. Kim*, D.H. Kang*, C.Y. Lee*

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

* Samsung Electro-Mechanics Co., LTD,
443-743 Suwon-City, Republic of Korea

Abstract In the present paper we have compared optical and electrical characteristics of high power multimode 835 nm laser diodes based on three solid solution systems: AlGaAs/GaAs, AlGaAs/GaAsP and (Al)GaInP/GaInAsP. 5 W continuous wave output optical power has been obtained from 80- μ m-aperture mesastripe laser diode based on any of three systems. The best maximum output optical power equal to 7 W has been reached in lasers based on (Al)GaInP/GaInAsP system.