

Мощные диодные лазеры ($\lambda = 1.7\text{--}1.8\text{ мкм}$) на основе асимметричных квантово-размерных гетероструктур раздельного ограничения InGaAsP/InP

© А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин[¶], Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Ю.А. Рябоштан*, А.А. Мармалюк*, И.С. Тарасов

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

* ФГУП НИИ „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха,
117342 Москва, Россия

(Получена 7 мая 2009 г. Принята к печати 15 мая 2009 г.)

Экспериментально показаны преимущества концепции мощных полупроводниковых лазеров на основе наногетероструктур диапазона длин волн излучения 1700–1800 нм, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии в системе твердых растворов InGaAsP/InP. Установлено, что применение расширенного волновода позволяет снизить внутренние оптические потери до 2 см^{-1} в квантово-размерных асимметричных двойных гетероструктурах раздельного ограничения InGaAsP/InP, излучающих на длине волны 1.76 мкм. На основе разработанных гетероструктур созданы многомодовые лазеры, излучающие оптическую мощность 2.5 Вт в апертуре 100 мкм при комнатной температуре в непрерывном режиме. Показано, что применение сильно напряженных квантово-размерных слоев InGaAsP в качестве активной области позволяет получать значения характеристической температуры $T_0 = 50\text{--}60\text{ К}$.

PACS: 42.55.Px

1. Введение

В настоящее время высокая мощность непрерывного оптического излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 1700\text{--}1800\text{ нм}$ широко востребована в медицине, а также для накачки твердотельных кристаллов, легированных гольмием, тулием [1], $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ и $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ [2]. В диодных лазерах для достижения длин волн излучения указанного диапазона наиболее технологичными и освоенными, особенно с точки зрения коммерческого приложения, являются системы твердых растворов InGaAsP/InP и AlInGaAs/InP. Ранее обе системы были успешно применены нами в квантово-размерных (КР) двойных гетероструктурах (ДГС) раздельного ограничения (РО), излучающих в диапазоне длин волн 1600–1900 нм [3–5]. На их основе были изготовлены и исследованы одномодовые (с шириной мезаполоскового контакта 5 мкм) [4,5] и многомодовые (с шириной мезаполоскового контакта 100 мкм) [4] диодные лазеры, в которых была достигнута максимальная оптическая мощность 0.15 и 1.6 Вт соответственно.

Дальнейшее увеличение выходной оптической мощности диодных лазеров в системе твердых растворов AlInGaAs/InP было связано с применением концепции мощных полупроводниковых лазеров [6], реализуемой в асимметричной КР РО ДГС с низкими внутренними оптическими потерями [7–10].

В данной работе представлены результаты применения асимметричных КР РО ДГС с расширенным волноводом в системе твердых растворов InGaAsP/InP для создания мощных диодных лазеров с длиной волны излучения $\sim 1750\text{ нм}$.

2. Экспериментальные образцы

Квантово-размерные ДГС раздельного ограничения с асимметричным расположением квантовой ямы в толстом волноводе изготавливались методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлорганических соединений) в системе твердых растворов InGaAsP/InP. Технология выращивания лазерных РО ДГС InGaAsP/InP с сильно напряженными квантовыми ямами с целью достижения генерации на максимально возможных длинах волн была отработана нами ранее и подробно описана в [4]. Лазерная структура включала в себя эмиттеры $n\text{-InP}$ (концентрация электронов $n = 8 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$) и $p\text{-InP}$ (концентрация дырок $p = 7 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$) (в качестве донорной и акцепторной примесей использовались кремний и цинк соответственно), преднамеренно нелегированный волновод на основе твердого раствора InGaAsP (ширина запрещенной зоны $E_{gw} = 1.0\text{ эВ}$) толщиной 2.5 мкм. Активная область была образована двумя напряженными квантовыми ямами InGaAsP, рассогласованными по параметру решетки на 1.2% относительно подложки InP. Квантовые ямы толщиной 90 \AA каждая были разделены барьерным слоем InGaAsP (ширина запрещенной зоны $E_g = 1.0\text{ эВ}$) толщиной 200 \AA . Положение активной области в волноводе было рассчитано в соответствии с концепцией мощных полупроводниковых лазеров [6].

На выращенных лазерных гетероструктурах с помощью фотолитографических операций формировались мезаполоски шириной $W = 100\text{ мкм}$, а пассивные области изолировались слоем SiO_2 , нанесенным методом магнетронного напыления. Далее на структуру наносились омические n - и p -контакты (Au/Te и Au/Zn соответствен-

[¶] E-mail: nike@hpld.ioffe.ru

но) и структура разделялась на лазерные диоды с длиной резонатора $L = 1\text{--}4\text{ мм}$. На торцы резонатора кристалла диодного лазера методом магнетронного напыления наносились зеркала Si/SiO_2 с коэффициентом отражения $R > 0.95$ и просветляющие покрытия SiO_2 с $R < 0.04$. Кристаллы лазерных диодов монтировались на медные теплоотводы слоями вниз с использованием индиевого припоя. Измерения проводились при стабилизации температуры теплоотвода с помощью элемента Пельтье с отводимой тепловой мощностью 72 Вт с площади $30 \times 40\text{ мм}$.

3. Эксперимент

В образцах диодных лазеров с разной длиной резонатора проводились измерения ватт-амперных характеристик в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 25°C . По результатам измерений образцов с естественно сколотыми гранями резонатора Фабри–Перо с использованием стандартных методик [11] определялись пороговая плотность тока при нулевых потерях на вывод излучения, внутренний квантовый выход стимулированного излучения и внутренние оптические потери. Значения указанных величин составили $J_{\text{th}} = 160\text{ А/см}^2$, $\eta_i = 60\%$ и $\alpha_i = 2\text{ см}^{-1}$ соответственно, что сравнимо с аналогичными параметрами, полученными в диодных лазерах на основе асимметричной КР РО ДГС AlInGaAs/InP [6]. Низкое значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения говорит о существовании достаточно эффективного канала утечек носителей из активной области вблизи порога генерации. Это типично для всех КР РО ДГС на основе твердых растворов InGaAsP/InP [3–5] и связано с эффектами оже-рекомбинации [12,13] и поглощения с участием спин-орбитально отщепленной подзоны [14], а также с большим сечением рассеяния на свободных носителях [15] и низкими коэффициентами диффузии носителей заряда [16]. Внутренние оптические потери, как и ожидалось, были значительно снижены благодаря увеличению толщины волновода. Это позволило нам увеличить оптимальную рабочую длину кристалла диодного лазера без существенных потерь в дифференциальной квантовой эффективности.

На рис. 1 приведена характерная зависимость непрерывной выходной оптической мощности излучения от тока накачки для диодных лазеров с длиной резонатора $L = 3.5\text{ мм}$ с нанесенными на грани резонатора просветляющими и отражающими диэлектрическими покрытиями. Ватт-амперная характеристика сохраняет линейный характер с наклоном 0.28 Вт/А (что соответствует значению внешней дифференциальной квантовой эффективности 40%) лишь вблизи порога генерации. Далее, с увеличением тока накачки, наблюдается плавное отклонение зависимости от линейности, что говорит о начале теплового разогрева кристалла. Это является следствием низкой эффективности преобразования электрической энергии в оптическую и неэффективным отводом от кристалла диодного лазера выделяемой тепловой энергии.

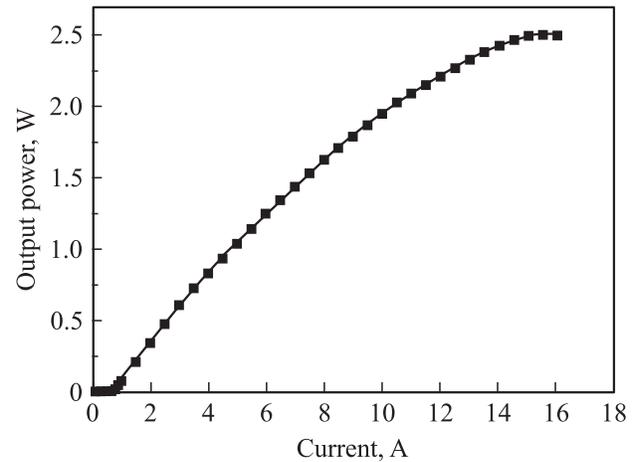


Рис. 1. Ватт-амперная характеристика в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 25°C для диодного лазера ($\lambda = 1.76\text{ мкм}$) с апертурой 100 мкм с антиотражающими и отражающими диэлектрическими покрытиями на резонаторе Фабри–Перо длиной $L = 3.5\text{ мм}$.

Начало теплового разогрева активной области диодного лазера приводит к возрастанию в ней концентрации носителей заряда и, как следствие, к резкому возрастанию процессов безызлучательной оже-рекомбинации и поглощения с переходом дырок в спин-орбитально отщепленную подзону [13]. Ватт-амперная характеристика достигает своего насыщения при оптической мощности 2.5 Вт. Это в 1.5 раза выше максимальной оптической мощности, достигнутой в диодных лазерах аналогичной конструкции на основе обычных КР РО ДГС [4]. Катастрофической оптической деградации структуры или зеркал резонатора Фабри–Перо диодного лазера обнаружено не было ни на одном из исследуемых образцов. Это характерно для лазеров на основе гетероструктур, изготовленных в не содержащих алюминий системах твердых растворов, а также указывает на хорошие морфологические характеристики эпитаксиальных слоев лазерной гетероструктуры.

Проводились измерения ватт-амперных характеристик в импульсном режиме при различных температурах теплоотвода в диапазоне $10\text{--}70^\circ\text{C}$ с целью оценки температурной зависимости порогового тока и внешней дифференциальной квантовой эффективности. Величины характеристических параметров, определенные из известных эмпирических соотношений [17], составили соответственно $T_0 = (55 \pm 5)\text{ К}$ и $T_1 = (150 \pm 10)\text{ К}$. Главными причинами высокой температурной чувствительности диодных лазеров данного типа являются рост интенсивности процессов оже-рекомбинации в активной области при увеличении длины волны генерации, поглощение с участием спин-орбитально отщепленной подзоны и меньшая глубина квантовой ямы для электронов по сравнению с диодными лазерами на основе системы твердых растворов AlInGaAs/InP [13].

Исследования спектров генерации диодных лазеров в непрерывном режиме накачки показали, что с повыше-

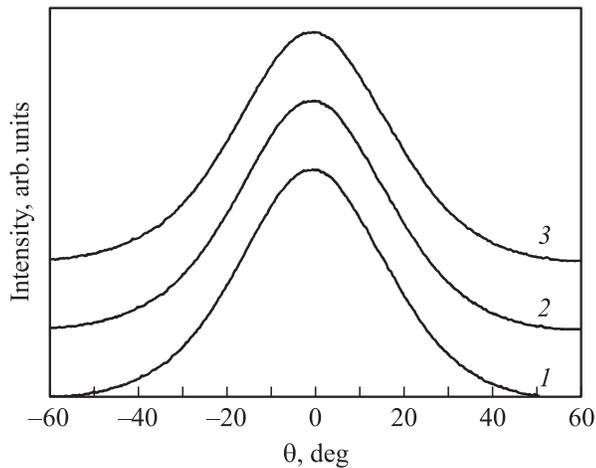


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, при различных значениях непрерывного тока накачки диодного лазера с длиной резонатора $L = 3.5$ мм и шириной мезаполоскового контакта $W = 100$ мкм. Ширина поля на половине интенсивности θ , град.: 1 — 38, 2 — 39, 3 — 40. Непрерывный ток накачки, А: 1 — 1, 2 — 6, 3 — 12.

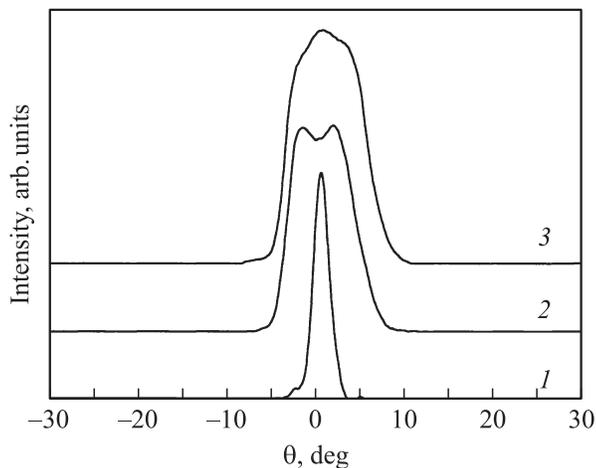


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне в плоскости, параллельной $p-n$ -переходу, при различных значениях непрерывного тока накачки диодного лазера с длиной резонатора $L = 3.5$ мм и шириной мезаполоскового контакта $W = 100$ мкм. Ширина поля на половине интенсивности θ , град.: 1 — 2, 2 — 8, 3 — 10. Непрерывный ток накачки, А: 1 — 1, 2 — 6, 3 — 12.

нием уровня инжекции происходит плавное расширение спектра излучения и его смещение в длинноволновую область. Это подтверждает факт разогрева активной области лазерного диода при непрерывной накачке. Ширина спектра генерации, измеренная на полувысоте интенсивности максимального пика с длиной волны 1760 нм, при максимальной оптической мощности составляла 8–10 нм.

Исследования в образцах диодных лазеров расходимости излучения в дальней зоне в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, подтвердили эффективность предложенного нами метода селекции поперечных мод оптического волновода, заключающегося в прецизионном смещении активной области из центра толстого волновода с целью подавления генерации мод высших порядков [10]. Как видно из рис. 2, генерация лазера на фундаментальной поперечной оптической моде сохраняется до максимальных значений токов накачки. Расходимость излучения по так называемой „медленной оси“ (в параллельной $p-n$ -переходу плоскости), показанная на рис. 3, увеличивается с повышением тока накачки от 2 до 8° по ширине (значения, измеренные на половинной высоте от максимальной интенсивности). Такие значения ширины в поведении диаграммы направленности характерны для мезаполосковой конструкции диодного лазера с шириной контакта 100 мкм.

4. Заключение

Концепция мощных диодных лазеров применена для создания лазерных гетероструктур в системе твердых растворов InGaAsP/InP, излучающих в диапазоне длин волн 1700–1800 нм. Выращенные методом газовой фазной МОС-гидридной эпитаксии двойные гетероструктуры раздельного ограничения с асимметричным расположением активной области в волноводе толщиной 2.5 мкм имели внутренние оптические потери около 2 см^{-1} , внутренний квантовый выход 60% и плотность тока инверсии 160 А/см^2 . Изготовленные на их основе диодные лазеры мезаполосковой конструкции с апертурой 100 мкм излучали максимальную непрерывную оптическую мощность 2.5 Вт при стабилизации температуры тепловода 25°C . Эта величина в 1.5–2 раза превышает максимальную непрерывную оптическую мощность, достигнутую в диодных лазерах на основе РО ДГС обычной конструкции. Ограничение оптической мощности в диодных лазерах на основе твердых растворов InGaAsP/InP связано в первую очередь с процессами оже-рекомбинации и поглощения в спин-орбитально отщепленную подзону, которые резко усиливаются с увеличением температуры активной области гетероструктуры.

Работа выполнена при поддержке программой президиума РАН № 27 и Госконтрактом 02.513.12.3011 в рамках федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы“.

Список литературы

- [1] S. Vatnik, E. Balashov, A. Pavljuk, E. Golikova, A. Lyutetskiy. Opt. Commun., **220**, 397 (2003).
- [2] E. Sorokin, S. Naumov, I.T. Sorokina. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **11** (3), 690 (2005).

- [3] Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **28** (3), 66 (2002).
- [4] А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, В.В. Шамахов, А.Ю. Андреев, Ю.А. Рябоштан, Е.Г. Голикова, И.С. Тарасов. ФТП, **37** (11), 1394 (2003).
- [5] А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, Е.Г. Голикова, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29** (7), 55 (2003).
- [6] А.В. Лютецкий, К.С. Борщев, А.Д. Бондарев, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, А.А. Мармалюк, Ю.А. Рябоштан, В.А. Симаков, И.С. Тарасов. ФТП, **41** (7), 883 (2007).
- [7] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **38** (3), 374 (2004).
- [8] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zn.I. Alferov. Electron. Lett., **40**, 1413 (2004).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981).
- [12] X. He, D. Xu, A. Ovtchinnikov, S. Wilson, F. Malarayar, R. Supe, R. Patel. Electron. Lett., **35**, 1343 (1999).
- [13] А.В. Лютецкий, К.С. Борщев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **42** (1), 106 (2008).
- [14] J.S. Major, D.W. Nam, J.S. Osinski, D.F. Welch. IEEE Photon. Technol. Lett., **5**, 594 (1993).
- [15] H.K. Choi, S.J. Eglash. IEEE J. Quant. Electron., **QE-27**, 1555 (1991).
- [16] H.K. Choi, S.J. Eglash. Appl. Phys. Lett., **61**, 1154 (1992).
- [17] Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, Г.А. Скрынников, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **34** (7), 886 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

1.7–1.8 μm high power diode lasers based on asymmetric quantum well InGaAsP/InP heterostructures of separate confinement

A.V. Lyutetskiy, N.A. Pikhtin, N.V. Fetisova, A.Yu. Leshko, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, Yu.A. Ryaboshtan*, A.A. Marmalyuk*, I.S. Tarasov

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

* Federal State Unitary Enterprise Research
and Development Institute „Polyus“,
117342 Moscow, Russia

Abstract Advantages of the concept of high power semiconductor lasers based on nanoheterostructures of 1700–1800 nm wavelength range grown in the InGaAsP/InP solid solution system by MOCVD method have been experimentally demonstrated. It has been established, that the use of broadened waveguide allows to reduce internal optical loss to 2 cm^{-1} in quantum well asymmetric separate confinement double heterostructures InGaAsP/InP emitting at 1760 nm. Multimode diode lasers emitting continuous optical power 2.5 W from $100\ \mu\text{m}$ aperture at the room temperature have been manufactured. It has been shown that the use of highly strained quantum dimension InGaAsP layers as an active region allows to obtain characteristic temperature values $T_0 = 50-60$ K.