

Свойства гетеролазеров на основе InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом

© 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

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

(Получена 27 января 2000 г. Принята к печати 27 января 2000 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены лазеры на гетероструктурах InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом, излучающие в диапазоне 1.3–1.5 мкм. Исследованы ватт-амперные и спектральные характеристики в импульсном и непрерывном режимах генерации в диапазоне температур 10–60°C. Определен перегрев активной области лазерного диода на 30–60°C относительно медного теплоотвода при насыщении мощности излучения в непрерывном режиме генерации. Установлено сильное влияние температурной зависимости дифференциальной квантовой эффективности на максимальную мощность в непрерывном режиме генерации гетеролазеров. В лазерах с мезаполосковым контактом шириной 100 мкм достигнута оптическая мощность излучения 3 и 2.6 Вт в непрерывном режиме генерации, 9 и 6.5 Вт — в импульсном режиме генерации соответственно на длинах волн 1.3 и 1.5 мкм.

1. Введение

В основе успехов развития мощных полупроводниковых лазеров лежит идея уменьшения внутренних оптических потерь [1]. Применение модифицированного метода жидкофазной эпитаксии позволило успешно ее реализовать [2]. В настоящее время рекордные значения оптической мощности ~ 11 Вт в непрерывном режиме достигнуты в лазерах, излучающих на длине волны $\lambda = 0.98$ мкм [3–5]. В лазерах на основе InGaAsP/InP получена мощность 5 Вт в непрерывном режиме генерации в лазерном диоде с шириной мезаполоскового контакта 200 мкм [6]. Различие в рекордных значениях в основном определяется энергетической зонной структурой полупроводниковых твердых растворов в системах AlGaAs/GaAs, InGaAsP/GaAs и InGaAsP/InP [7].

В работах [8,9] отмечается, что в лазерах на основе InGaAsP/GaAs максимальная оптическая мощность в непрерывном режиме генерации сильно зависит от величины параметра T_1 , характеризующего температурную зависимость дифференциальной квантовой эффективности [9]. Параметр T_1 является особенно важным для лазеров на основе твердых растворов InGaAsP/InGaAs/InP, имеющих высокую температурную чувствительность [10,11].

Основная цель работы состоит в исследовании свойств лазерных диодов InGaAsP/InP раздельного ограничения, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) [12], для выявления основных факторов, ограничивающих максимальную мощность оптического излучения. Для этого в лазерных диодах с различной длиной резонатора были исследованы ватт-амперные характеристики $P(I)$ в импульсном и непрерывном режимах генерации, температурные зависимости пороговой плотности тока, дифференциальной квантовой эффективности и спектры излучения.

2. Экспериментальные образцы

В качестве базовой лазерной гетероструктуры была выбрана структура раздельного ограничения (РО) с двумя квантово-размерными напряженными активными областями [3–5,12]. Уровень легирования волновода, определяемый техническими возможностями используемой установки, составлял величину 10^{16} см $^{-3}$. Концентрация свободных носителей в эмиттерах p - и n -типа проводимости была 10^{17} см $^{-3}$, поскольку дальнейшее снижение вело к возрастанию последовательного сопротивления структуры. Для уменьшения внутренних оптических потерь толщина волновода была доведена до 0.9 мкм. Дальнейшее увеличение толщины волновода

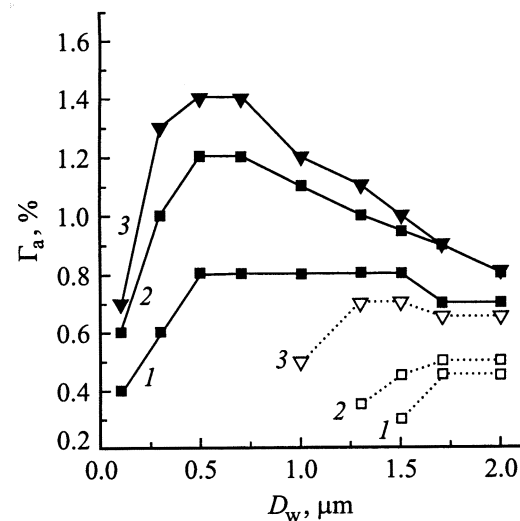


Рис. 1. Расчетная зависимость коэффициента оптического ограничения активной области (Γ_a) для нулевой (сплошная линия) и второй (пунктирная) моды от толщины волновода (D_w) лазерной гетероструктуры раздельного ограничения InGaAsP/InP. Ширина запрещенной зоны твердого раствора InGaAsP-волновода E_w , эВ: 1 — 1.25, 2 — 1.18, 3 — 1.1.

[¶] Факс: (812) 247 80 38
E-mail: tarasov@hpld.ioffe.rssi.ru

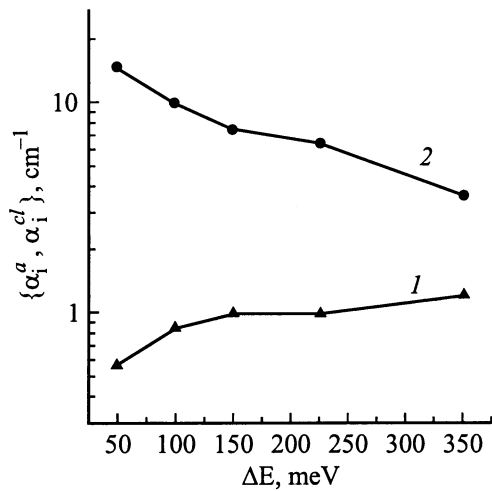


Рис. 2. Расчетная зависимость внутренних оптических потерь в активной области α_i^a (1) и в эмиттерных слоях α_i^{cl} (2) от величины $\Delta E = E_g^{cl} - E_g^w$.

нецелесообразно из-за возникновения мод высших порядков (рис. 1). Для такой структуры были рассчитаны внутренние оптические потери в эмиттерных слоях α_i^{cl} и в активной области α_i^a в зависимости от величины $\Delta E = E_g^{cl} - E_g^w$, где E_g^{cl} , E_g^w , E_g^a — ширина запрещенной зоны эмиттера, волновода и активной области (рис. 2). При толщинах двух квантовых ям по 60 \AA оптическими потерями в активной области можно пренебречь (рис. 2). Потери в эмиттерных слоях минимальны при $E_g^w = E_g^a$. В этом случае фактор оптического ограничения волновода Γ_w максимален. Поэтому состав твердого раствора волноводного слоя был выбран из условия обеспечения глубины квантовой ямы для электронов, равной $4kT$. При этом учитывалось, что в структуре InGaAsP/InP разрыв зоны проводимости составляет 1/3 от общей разности запрещенных зон ΔE_g [7]. На основании этого ширина запрещенной зоны волноводного слоя в лазерной структуре с длиной волны излучения $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ выбиралась 1.25 эВ , а в структуре с $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ — 1.1 эВ . Такие лазерные гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии в [13]. По стандартной постростовой технологии из гетероструктур изготавливались лазерные диоды мезаполосковой конструкции с шириной контакта 100 мкм [12].

3. Экспериментальные результаты

3.1. Исследование ватт-амперных характеристик

Для исследования лазерных диодов в импульсном режиме предпочтительна длительность импульса тока накачки менее 100 нс . Это практически исключает разогрев

активной области лазерного диода, но вносит некоторые сложности в измерение мощности оптического излучения ваттного диапазона. Поэтому для исследований лазерных диодов в импульсном режиме была выбрана длительность импульса 2 мкс . В этом случае при токах накачки $I > 10 \text{ А}$ наблюдается некоторый разогрев активной области лазерного диода с длиной резонатора $L = 1.5\text{--}2 \text{ мм}$ (рис. 3, а). Тем не менее, в импульсном режиме генерации в лазерных диодах с $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ была получена оптическая мощность $P = 9 \text{ Вт}$, а в диодах с $\lambda = 1.5 \text{ мкм}$ оптическая мощность достигала $P = 6.5 \text{ Вт}$ (рис. 3, а).

В непрерывном режиме генерации наблюдается сильный разогрев активной области лазерного диода, выражающийся в загибе ватт-амперной характеристики. Особенно хорошо это видно в лазерных диодах с малой длиной

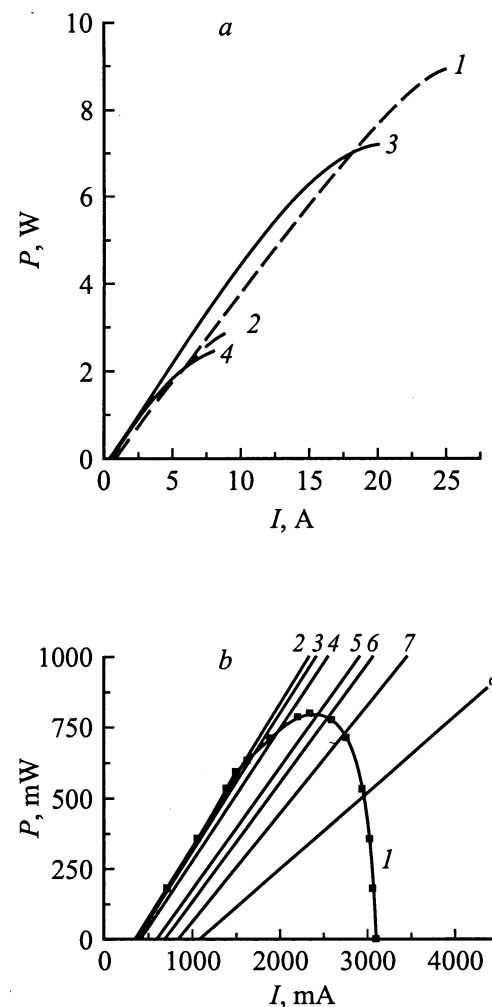


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики лазерных диодов. а — лазерные диоды с $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$, $L = 2 \text{ мм}$ (1, 2) и $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$, $L = 1.2 \text{ мм}$ (3, 4); 1, 3 — импульсный режим генерации; 2, 4 — непрерывный; температура теплоотвода 10°C . б — лазерный диод с $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$, $L = 500 \text{ мкм}$; 1 — непрерывный режим генерации, 2–8 — импульсный; температура теплоотвода, $^\circ\text{C}$: 1, 2 — 11, 3 — 14, 4 — 20, 5 — 34, 6 — 41, 7 — 50, 8 — 56.

резонатора ($L \approx 500$ мкм) (рис. 3, *b*). Тем не менее в длинных лазерных диодах ($L \approx 1.5$ мм) с $\lambda = 1.3$ мкм была получена оптическая мощность излучения 3 Вт, а в лазерных диодах с $\lambda = 1.5$ мкм оптическая мощность достигала 2.5 Вт при ширине мезаполоскового контакта 100 мкм. Наибольшее известное нам значение оптической мощности в непрерывном режиме генерации на длине волны 1.48 мкм составляет 5 Вт при ширине мезаполоскового контакта 200 мкм [6].

3.2. Исследование эффекта перегрева активной области лазерного диода

В лазерных диодах двумя способами определялась температура активной области. Для этого проводилось сравнение ватт-амперных характеристик, измеренных в непрерывном режиме генерации при температуре медного теплоотвода 10°C и в импульсном режиме при температурах теплоотвода выше 10°C . В точке пересечения ватт-амперных характеристик (рис. 3, *b*) из разности температур теплоотвода в непрерывном и импульсном режимах определялась температура перегрева активной области.

Во втором случае регистрировались спектры излучения в импульсном и непрерывном режимах генерации при некотором токе накачки. Из разницы в положении максимумов спектров генерации определялась величина перегрева активной области лазерной гетероструктуры. Величины перегрева, определенные двумя способами, совпадали с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Разогрев активной области лазерного диода при максимальных токах накачки в непрерывном режиме генерации составлял $30\text{--}60^\circ\text{C}$ в зависимости от длины резонатора.

Необходимо отметить, что в исследуемых образцах нам удалось снизить удельное сопротивление лазерной структуры до величины $\rho_s \leq 10^{-4}$ Ом \cdot см². Последовательно сопротивление лазерного диода с длиной резонатора 2 мм в этом случае составляет величину 0.05 Ом, что, по нашим сведениям, является лучшим результатом из известных по литературным данным. Дальнейшее существенно снижение последовательного сопротивления лазерной структуры потребует кардинального изменения постростового процесса. Поэтому для повышения оптической мощности лазерных диодов существенной становится температурная зависимость дифференциальной квантовой эффективности.

3.3. Температурная зависимость пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности

Температурная зависимость пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности лазерных диодов исследовалась в интервале температур $10\text{--}50^\circ\text{C}$. На рис. 4 приведена зависимость характеристической температуры T_0 от длины резонатора. Зависимость имеет вид, характерный для лазеров с тонкой активной областью и раздельным электронным и

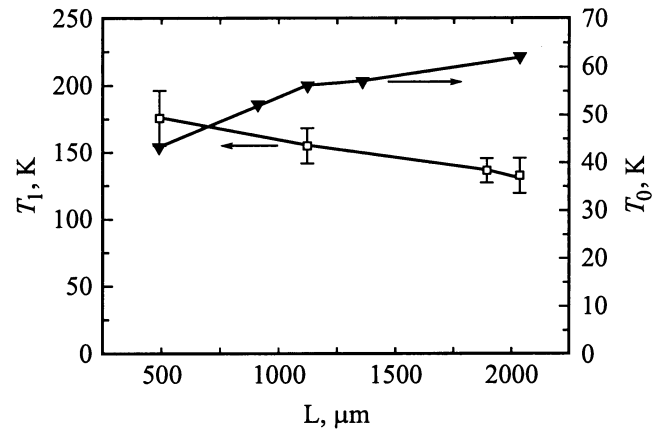


Рис. 4. Зависимость характеристических параметров T_0 и T_1 от длины резонатора лазерных диодов.

оптическим ограничением [10]. В длинных лазерных диодах величина T_0 составляет $40\text{--}60^\circ\text{C}$ и оказывается ниже значений этого параметра в аналогичных лазерах на подложке GaAs ($T_0 = 100\text{--}200^\circ\text{C}$) [5]. Однако даже в коротких образцах лазерных диодов влияние увеличения пороговой плотности тока на максимальное значение выходной оптической мощности несущественно по сравнению с вкладом влияния температурной зависимости дифференциальной квантовой эффективности (рис. 3, *b*).

На рис. 4 приведена зависимость характеристической температуры T_1 от длины резонатора лазерного диода, которая является параметром в температурной зависимости дифференциальной квантовой эффективности [9]:

$$\eta_d(T) = \eta_d(20^\circ\text{C}) \exp[-(T - 20^\circ\text{C})/T_1]. \quad (1)$$

Ход зависимости имеет противоположную тенденцию по сравнению с зависимостью T_0 , что плохо согласуется с концепцией увеличения длины резонатора мощного лазерного диода. Существенным является низкое значение параметра T_1 в лазерных диодах на основе твердых растворов InGaAsP/InP. В лазерах на подложке GaAs этот параметр достигает $300\text{--}1600^\circ\text{C}$ в зависимости от длины лазерного диода [9]. Следствием этого является резкое снижение дифференциальной квантовой эффективности при перегреве активной области как короткого лазерного диода InGaAsP/InP (рис. 3, *b*), так и длинного (рис. 3, *a*).

Исследование температурных зависимостей величины обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора лазерного диода позволило определить температурные зависимости α_i и η_i . Это — величины внутренних оптических потерь (α_i) и внутреннего квантового выхода (η_i) в хорошо известной формуле дифференциальной квантовой эффективности

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_{\text{out}}}{\alpha_{\text{out}} + \alpha_i}. \quad (2)$$

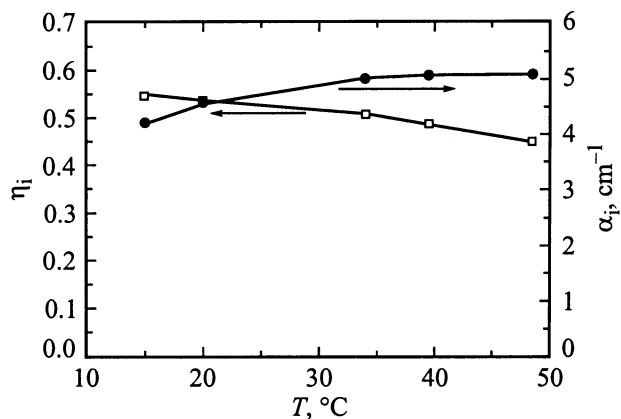


Рис. 5. Зависимость внутренних оптических потерь α_i и внутреннего квантового выхода η_i от температуры.

На рис. 5 приведены температурные зависимости величин η_i и α_i . Величина внутреннего квантового выхода η_i является характеристикой лазерной гетероструктуры; η_i за порогом генерации количественно характеризует наличие токовых утечек и каналов безызлучательной рекомбинации в гетероструктуре и, естественно, зависит от температуры активной области. Снижение температурной чувствительности η_i , по нашему мнению, возможно посредством улучшения конструкции лазерной гетероструктуры.

Величина стимулированного квантового выхода, определяемая как

$$\eta = (1/\tau_r)(1/\tau_r + 1/\tau_{nr})^{-1}, \quad (3)$$

зависит от соотношения времен жизни стимулированного излучательного (τ_r) и безызлучательного (τ_{nr}) процессов рекомбинации и за порогом генерации близка к единице.

Величина внутренних оптических потерь возрастает с ростом температуры, причем в процентном соотношении изменение соответствует лазерам на подложке GaAs в аналогичной зависимости [5]. Поэтому снижение его влияния на η_i , по нашему мнению, можно осуществить путем уменьшения абсолютного значения величины α_i .

4. Выводы и обсуждение результатов

В результате работы изготовлены и исследованы мезаполосковые лазерные диоды InGaAsP/InP с широким контактом. Достигнута оптическая мощность излучения $P = 3$ и 2.6 Вт в непрерывном, $P = 9$ и 6.5 Вт в импульсном режимах генерации соответственно на длинах волн $\lambda = 1.3$ и 1.5 мкм. Показано, что в непрерывном режиме генерации активная область лазерного диода перегревается относительно теплоотвода на 30 – 60°C при максимальной мощности излучения. Установлено, что наряду с внутренними оптическими потерями и последовательным сопротивлением лазерной структуры

на максимальную мощность лазерного диода оказывает сильное влияние температурная зависимость дифференциальной квантовой эффективности. Из-за низкого значения параметра T_1 этот эффект наиболее сильно проявляется в лазерах InGaAsP/InP.

В заключение авторы выражают благодарность Н.Ю. Давидюку и С.О. Слипченко за разработку методики измерений мощного лазерного излучения в диапазоне длин волн 1.3 – 1.65 мкм и Г.Г. Зегрю за плодотворное обсуждение результатов. Работа поддержана МНТП России "Физика твердотельных наноструктур" (гранты 97-1035, 99-2038, 99-2037).

Список литературы

- [1] В.П. Евтихийев, Д.З. Гарбузов, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин, В.П. Чалый, А.В. Чудинов. ФТП, **19**, 1420 (1985); Ж.И. Алфёров, Д.З. Гарбузов, А.Б. Нивин, А.В. Овчинников, И.С. Тарасов. ФТП, **19**, 456 (1985).
- [2] D.Z. Garbuzov, N.Yu. Antonishkis, A.D. Bondarev, A.B. Gulakov, S.N. Zhigulin, N.I. Katsavets, A.V. Kochergin, E.V. Rafailov. IEEE J. Quant. Electron., **27**, 1531 (1991).
- [3] L.J. Mawst, A. Bhattacharya, J. Lopez, D. Botez, D.Z. Garbuzov, L. DeMarco, J.C. Connolly, M. Jansen, F. Fang, R.F. Nabiev. Appl. Phys. Lett., **69**, 1532 (1996).
- [4] A. Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, J.C. Connolly. Appl. Phys. Lett., **73**, 1182 (1998).
- [5] M.R. Gokhale, J.C. Dries, P.V. Studenkov, S.R. Forrest, D.Z. Garbuzov. IEEE J. Quant. Electron., **33**, 2266 (1997).
- [6] A. Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, J.C. Connolly. Appl. Phys. Lett., **73**, 1182 (1997).
- [7] S. Adachi. *Physical Properties of 3-5 Semiconductor Compounds* (John Wiley & Sons Inc., 1992).
- [8] D. Botes. Appl. Phys. Lett., **74**, 3102 (1999).
- [9] L.J. Mawst, A. Bhattacharya, M. Nesnidal, J. Lopez, D. Botez, J.A. Morris, P. Zory. Appl. Phys. Lett., **67**, 2901 (1995).
- [10] И.С. Тарасов, Д.З. Гарбузов, В.П. Евтихийев, А.В. Овчинников, З.Н. Соколова, А.В. Чудинов. ФТП, **19**, 1496 (1985).
- [11] Н. Temkin, D. Coblenz, R.A. Logan, J.P. van der Zil, T. Tanbun-Ek, R.D. Yadvish, A.M. Sergent. Appl. Phys. Lett., **62** (19), 2402 (1993).
- [12] Е.Г. Голикова, В.А. Горбылев, Н.Ю. Давидюк, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, В.А. Симаков, И.С. Тарасов, Н.В. Фетисова. Письма ЖТФ, **26** (6), 5 (2000).
- [13] Е.Г. Голикова, В.П. Дураев, С.А. Козиков, В.Г. Кригель, О.А. Лабутин, В.И. Швейкин. Квант. электрон., **22**, 85 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Properties of wide mesa stripe InGaAsP/InP heterolasers

E.G. Golikova, V.A. Kureshov, A.Yu. Leshko,
A.V. Lyutetskiy, N.A. Pikhtin, Yu.A. Ryaboshtan,
G.V. Skrinnikov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov

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

Abstract InGaAsP/InP wide mesa stripe laser diodes ($\lambda = 1.3\text{--}1.55\ \mu\text{m}$) grown by the metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD) method have been fabricated. Light-current characteristics and emission spectra under pulse and continuous wave (CW) operation have been investigated in $10\text{--}60^\circ\text{C}$ temperature range. Laser diode active region overheating of $30\text{--}60^\circ\text{C}$ in relation to the copper heatsink has been determined. Strong influence of the external differential quantum efficiency temperature dependence on CW maximum output power has been established. Optical output power of 3 and 2.6 W under CW operation, 9 and 6.5 W under pulse operation have been reached for a single $100\text{-}\mu\text{m}$ -wide aperture mesa stripe InGaAsP/InP laser diodes emitting at 1.3 and $1.55\ \mu\text{m}$ wavelength, respectively.