

07

## Мощные InGaAsP/InP лазеры, излучающие на длине волны 1.8 $\mu\text{m}$

© Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий,  
Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова,  
Н.В. Фетисова, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов

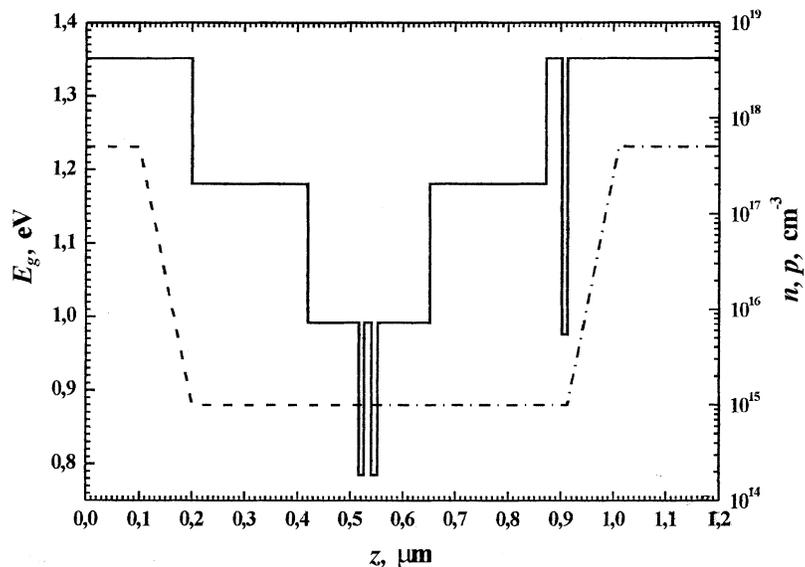
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 13 сентября 2001 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений изготовлены InGaAsP/InP лазерные гетероструктуры раздельного ограничения с двумя напряженными квантовыми ямами. На длине волны излучения 1.8  $\mu\text{m}$  получена оптическая мощность 1.2 W в непрерывном режиме генерации при 20°C в лазерных диодах с шириной полоска 100  $\mu\text{m}$ . Минимальная пороговая плотность тока составила 320 A/cm<sup>2</sup>, а дифференциальная квантовая эффективность  $\eta_d = 28\%$  при длине резонатора Фабри-Перо 1.4 mm. Внутренние оптические потери равнялись 5.6 cm<sup>-1</sup>.

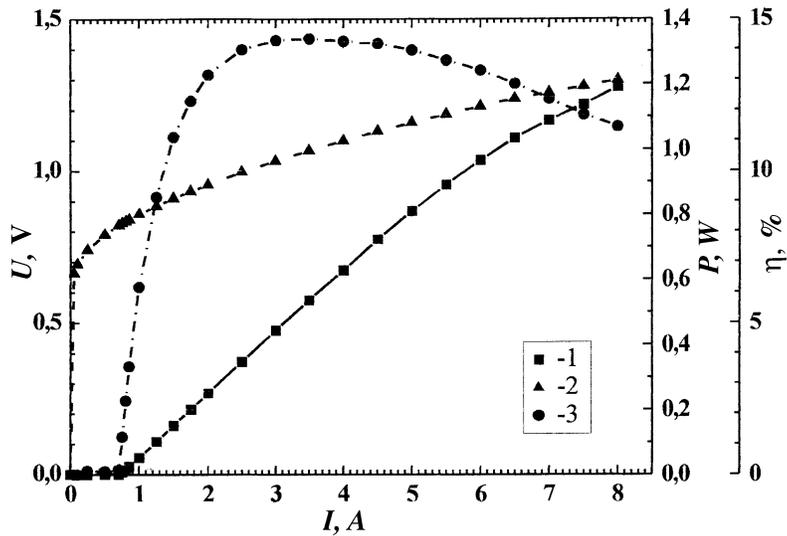
Полупроводниковые лазеры, излучающие в диапазоне длин волн 1.8–1.9  $\mu\text{m}$ , имеют обширную область применения. Они широко используются для накачки легированных гольмием (Ho) кристаллов, в лазерной диодной спектроскопии и медицине. Разработка и создание таких лазерных диодов ведутся в нескольких лабораториях, достигших высокого уровня МОС-гидридной и молекулярно-пучковой технологий [1–6]. Для создания лазерных диодов, излучающих в диапазоне 1.8–1.9  $\mu\text{m}$ , применяются системы твердых растворов InGaAsP [1–3] и AlGaInAsSb [4–5]. Технологичность системы твердых растворов InGaAsP делает ее применение предпочтительнее.

В этом сообщении мы продолжаем цикл работ, посвященных созданию мощных полупроводниковых лазеров в системе твердых растворов InGaAsP на основе лазерных гетероструктур раздельного ограничения (РО) методом гидридной эпитаксии металлоорганических соединений (МОС) [6–10]. Цель работы состояла в разработке технологии получения гетероструктур с напряженными квантовыми ямами в системе твердых растворов InGaAsP, излучающих на длине волны 1.8–1.9  $\mu\text{m}$ , и лазеров на их основе.



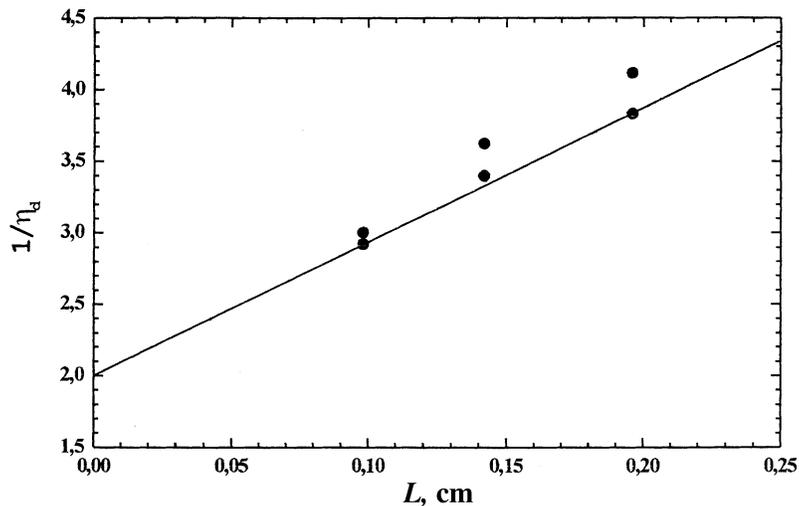
**Рис. 1.** Схематическая зонная диаграмма InP/InGaAsP гетероструктуры раздельного ограничения (сплошная кривая). Расчетные профили легирования для донорной примеси (Si — пунктир) и акцепторной примеси (Zn — штрихпунктир).

На подложках фосфида индия *n*-типа были изготовлены PO InGaAsP лазерные гетероструктуры с двумя напряженными квантовыми ямами. Состав твердого раствора InGaAsP напряженных квантовых ям подбирался так, чтобы параметр несоответствия постоянных решетки был максимальным (1,5%). Это позволило получить напряженные слои с высоким внутренним квантовым выходом и увеличить срок службы лазерных диодов [2]. На рис. 1 приведена зонная диаграмма таких гетероструктур. Состав твердого раствора напряженных квантовых ям InGaAsP активной области соответствовал  $E_g = 0.68$  eV. Толщина квантовых ям была  $90 \text{ \AA}$ . Толщина промежуточного волноводного слоя между ямами составляла  $200 \text{ \AA}$ . Волноводный слой толщиной  $D = 0.5 \mu\text{m}$  имел ширину запрещенной зоны  $E_{gw} = 1.03$  eV. Активная область



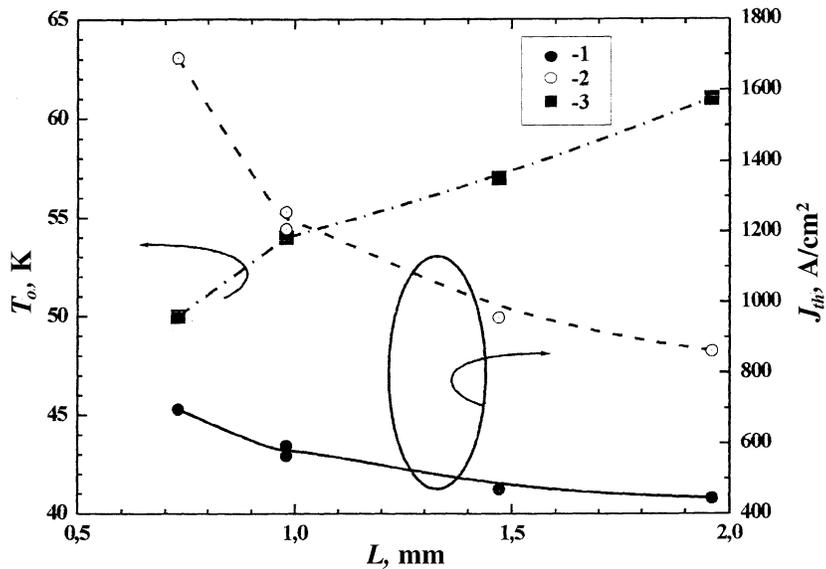
**Рис. 2.** Ватт-амперная (1, сплошная линия) и вольт-амперная (2, штриховая линия) характеристики и зависимость коэффициента полезного действия (3, штрихпунктирная линия) от тока накачки лазерного диода с  $W = 100 \mu\text{m}$ , длиной резонатора  $L = 1400 \mu\text{m}$  и диэлектрическими покрытиями AR (5%)/HR (95%).

и волноводные слои преднамеренно не легировались. Широкозонные  $N$ - и  $P$ -эмиттеры толщиной по  $1.5 \mu\text{m}$  легировались до концентрации  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Контактный слой толщиной  $0.3 \mu\text{m}$  имел концентрацию  $p$ -типа  $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . В изолирующем слое  $\text{SiO}_2$  полученных лазерных гетероструктур с помощью фотолитографических операций формировались полосы шириной  $W = 100 \mu\text{m}$ . Затем структуры снабжались омическими контактами Au/Te и Au/Zn. Структура разделялась на лазерные диоды с длиной резонатора  $L = 500\text{--}4000 \mu\text{m}$ . На торцы резонатора наносились зеркала Si/SiO<sub>2</sub> с коэффициентом отражения  $R > 0.95$  и просветляющие покрытия с  $R < 0.08$ . Образцы лазерных диодов монтировались на медные теплоотводы с использованием индиевого припоя.



**Рис. 3.** Зависимость обратной величины внешней дифференциальной квантовой эффективности ( $1/\eta_d$ ) от длины резонатора ( $L$ ) для InP/InGaAsP лазерных диодов ( $\lambda = 1.8 \mu\text{m}$ ) с шириной полоска  $W = 100 \mu\text{m}$  (точки).

Исследовались ватт-амперные характеристики лазерных диодов с длиной волны  $1.8 \mu\text{m}$  в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода  $T = 20^\circ\text{C}$  (рис. 2). Для лазерных диодов с длиной резонатора  $1.4 \text{mm}$  удалось получить мощность оптического излучения  $1.2 \text{W}$ , причем для токов накачки вплоть до  $4 \text{A}$  значение дифференциальной квантовой эффективности оставалось неизменным ( $\eta_d = 28\%$ ). Коэффициент полезного действия  $\eta$  при этом составлял  $14.5\%$ . Дальнейшее увеличение длины резонатора было нецелесообразно из-за достаточно высоких внутренних потерь, которые приводили к снижению  $\eta_d$ . Приведенное значение дифференциального сопротивления составляло  $1.2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Загиб ватт-амперной характеристики, связанный с разогревом активной области, наступал при токах накачки  $8\text{--}10 \text{A}$  для лазерных диодов с длинами резонаторов  $1.4\text{--}2 \text{mm}$  соответственно, что, по нашему мнению, связано с низким значением внутреннего стимулированного квантового выхода и высокими внутренними оптическими потерями.



**Рис. 4.** Зависимость пороговой плотности тока ( $J_{th}$ ) при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  (1, сплошная линия) и  $60^{\circ}\text{C}$  (2, штриховая линия) и характеристического параметра  $T_0$  (3, штрихпунктирная линия) от длины резонатора ( $L$ ) для InP/InGaAsP лазерных диодов ( $\lambda = 1.8 \mu\text{m}$ ) с шириной полоска  $W = 100 \mu\text{m}$ .

Пороговые плотности тока в четырех сколотых образцах составляли величину порядка  $300\text{--}350 \text{ A/cm}^2$ , что в два раза больше, чем в лазерах с длиной волны излучения  $1.3 \mu\text{m}$  [6,7].

На рис. 3 приведена зависимость обратной величины дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора Фабри-Перо. Аппроксимация этой зависимости позволяет определить величину внутреннего квантового выхода лазерного диода. В нашем случае стимулированный внутренний квантовый выход для лазеров с длиной волны излучения  $1.8 \mu\text{m}$  составил величину  $\eta_i = 50 \pm 3\%$ . Зависимость, приведенная на рис. 3, также позволяет определить у изготовленных структур величину внутренних оптических потерь  $\alpha_i = 5.6 \text{ cm}^{-1}$ . Дизайн лазерных структур может быть доработан с целью уменьшения внутренних оптических потерь в эмиттерах  $n$ - и  $p$ -типа. Использование

ступенчатого волновода [11] должно привести к возрастанию стимулированного внутреннего квантового выхода.

Исследованы температурные зависимости пороговой плотности тока изготовленных лазерных диодов. Измерение ватт-амперных характеристик проводилось в температурном диапазоне 10–60°C. Результаты исследований приведены на рис. 4. Характеристический параметр  $T_0$  в зависимости от длины резонатора лазерного диода составлял 50–60°C, что практически совпадает с величиной  $T_0$  для лазеров с длиной волны излучения 1.5  $\mu\text{m}$  [12].

Таким образом, были получены лазерные диоды с мощностью оптического излучения в непрерывном режиме генерации 1.2 W на длине волны 1.8  $\mu\text{m}$ . Дифференциальная квантовая эффективность составляла 28% для лазерных диодов с длиной резонатора 1.4 mm. Коэффициент полезного действия в зависимости от длины резонатора был 12–16%, а внутренние оптические потери равнялись 5.6  $\text{cm}^{-1}$ . Значение характеристического параметра  $T_0$  в температурном диапазоне 10–60°C составляло величину 50–60°C.

Работа поддержана программой МНТП "Физика твердотельных наноструктур" (проекты 99–2037, 99–2038) и РФФИ (проект 01–02–17851).

## Список литературы

- [1] O'Brien S., Plano W., Major J., Welch D.F., Tally T. // Electron. Lett. 1995. V. 31. P. 105.
- [2] He X., Xu D., Ovtchinnikov A., Wilson S., Malarayap F., Supe R., Patel R. // Electron. Lett. 1999. V. 35. P. 1343.
- [3] Major J.S., Nam D.W., Osinski J.S., Welch D.F. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1993. V. 5. P. 594.
- [4] Choi H.K., Eglash S.J. // IEEE J. Quantum Electron. 1991. V. QE-27. P. 1555.
- [5] Choi H.K., Eglash S.J. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 1154.
- [6] Livshits D.A., Kochnev I.V., Lantratov V.M., Ledentsov N.N., Nalyot T.A., Tarasov I.S., Alferov Zh.I. // Electron. Lett. 2000. V. 36. P. 1848.
- [7] Лившиц Д.А., Егоров А.Ю., Кочнев И.В., Капитонов В.А., Лантратов В.М., Леденцов Н.Н., Налет Т.А., Тарасов И.С. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 380.
- [8] Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Скрынников Г.В., Соколова З.Н., Тарасов И.С., Фетисова Н.В. // ФТП. 2000. Т. 34. С. 1457.

- [9] Голикова Е.Г., Горбылев В.А., Ильин Ю.В., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Симаков В.А., Тарасов И.С., Третьякова Е.А., Фетисова Н.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 7. С. 57.
- [10] Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Скрынников Г.А., Тарасов И.С., Алферов Ж.И. // ФТП. 2000. Т. 34. С. 886.
- [11] Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лившиц Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Слипченко С.О., Тарасов И.С., Фетисова Н.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 20. С. 40.
- [12] Зегря Г.Г., Пихтин Н.А., Скрынников Г.В., Слипченко С.О., Тарасов И.С. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 8. С. 1001.