

06;07;12

Мощные InGaAsP-гетеролазеры раздельного ограничения, полученные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений

© *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*

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

Поступило в Редакцию 10 ноября 1999 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений изготовлены InGaAsP/InP лазерные гетероструктуры с двумя напряженными квантовыми ямами с длинами волн излучения 1.3–1.55 μm . Получена оптическая мощность излучения 2.4 W в непрерывном режиме генерации при 20°C в лазерных диодах с шириной полоска 100 μm . Минимальная пороговая плотность тока составила 260 A/cm². Достигнута дифференциальная квантовая эффективность $\eta_d = 40\%$ при длине резонатора Фабри–Перо 1.9 mm. Внутренние оптические потери снижены до 2.6–4.2 cm⁻¹.

Успехи в разработке мощных полупроводниковых лазеров с малыми внутренними оптическими потерями достигнуты при создании лазерных диодов, излучающих в диапазонах длин волн 0.8–1.0 μm [1–3]. В последнее время для увеличения мощности излучения лазерных диодов длинноволнового диапазона ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) был развит аналогичный подход [4]. Разрабатываемая нами долгое время технология InGaAsP гетероструктур раздельного ограничения (РО) с малыми внутренними потерями при использовании жидкостной эпитаксии не позволяет полностью реализовать все достоинства предлагаемой концепции [5].

Целью настоящей работы являются разработка и исследование РО InGaAsP лазерных гетероструктур с малыми оптическими потерями для создания мощных лазерных диодов, излучающих в диапазоне 1.3–1.55 μm с использованием метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии).

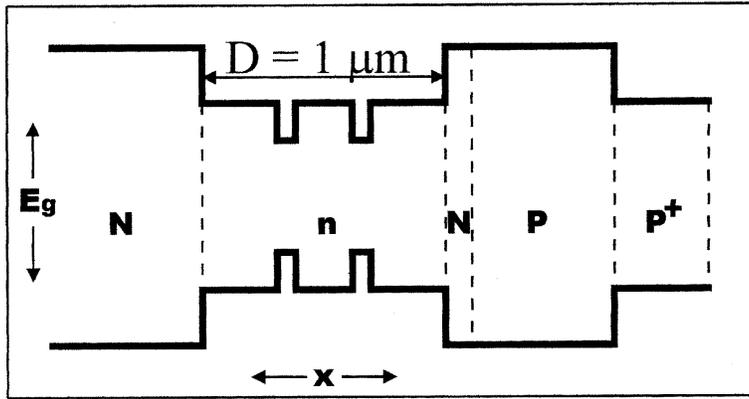


Рис. 1. Схематическое изображение зонной диаграммы лазерных гетероструктур.

Этим методом [6] на подложках фосфида индия *n*-типа были изготовлены PO InGaAsP лазерные гетероструктуры с двумя напряженными квантовыми ямами. На рис. 1 приведена зонная диаграмма таких гетероструктур. Структуры различались составом твердого раствора активной области и волноводных слоев. Состав твердого раствора напряженных квантовых ям InGaAsP активной области соответствовал $E_g = 0.95 \text{ eV}$ ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) и $E_g = 0.8 \text{ eV}$ ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$). Толщина квантовых ям была 50 \AA . Толщина промежуточного волноводного слоя между ямами составляла 150 \AA . Волноводный слой толщиной $D = 1 \mu\text{m}$ имел ширину запрещенной зоны $E_{gB} = 1.1 \text{ eV}$ (для $1.55 \mu\text{m}$ излучения) и $E_{gB} = 1.25 \text{ eV}$ (для $1.3 \mu\text{m}$). Активная область и волноводные слои преднамеренно не легировались. Широкозонный *P*-эмиттер толщиной $1 \mu\text{m}$ легировался до концентрации $7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Контактный слой толщиной $0.3 \mu\text{m}$ имел концентрацию *p*-типа $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. На полученных лазерных гетероструктурах в изолирующем слое SiO_2 с помощью фотолитографических операций формировались полоски 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_2 с $R > 0.95$ и просветляющие покрытия с $R < 0.04$.

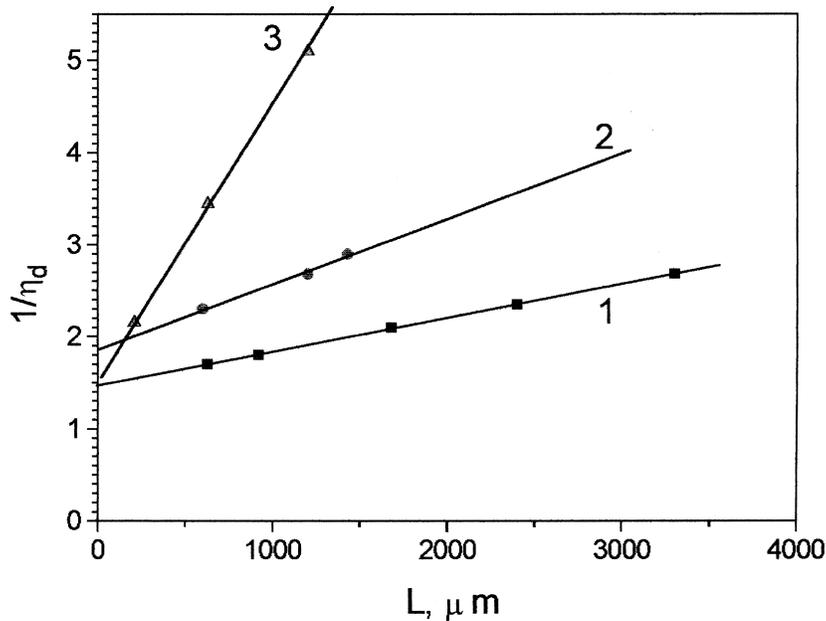


Рис. 2. Зависимость обратной величины дифференциальной квантовой эффективности от длины лазерных диодов, изготовленных из гетероструктур с двумя напряженными квантовыми ямами с длинами волн излучения $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ (1) и $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (2) и одной ненапряженной квантовой ямой с длиной волны излучения $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ (3): 1 — $\eta_i = 67\%$, $\alpha_i = 2.6 \text{ cm}^{-1}$; 2 — $\eta_i = 53\%$, $\alpha_i = 4.2 \text{ cm}^{-1}$; 3 — $\eta_i = 66\%$, $\alpha_i = 23 \text{ cm}^{-1}$.

Образцы лазерных диодов монтировались на медные теплоотводы с использованием индиевого припоя.

На рис. 2 приведена зависимость обратной величины дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора Фабри–Перо. Аппроксимация этих зависимостей позволяет определить величину внутреннего квантового выхода лазерных диодов. В нашем случае внутренний квантовый выход для лазеров с длиной волны излучения $1.3 \mu\text{m}$ составил величину $\eta_i = 67 \pm 3\%$ и для образцов с длиной волны излучения $1.55 \mu\text{m}$ $\eta_i = 53 \pm 3\%$. Для обеих структур величина внутреннего квантового выхода несколько хуже, чем лучшие известные

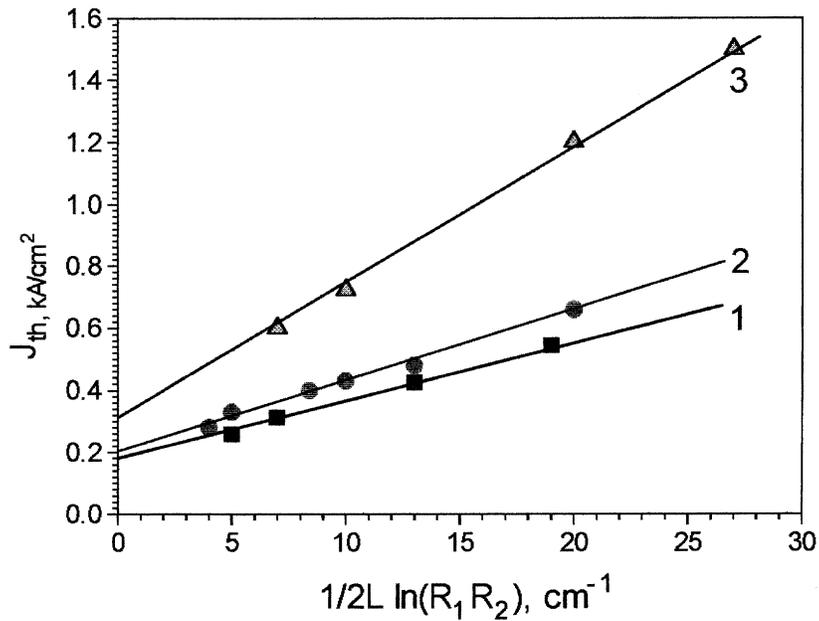


Рис. 3. Зависимость пороговой плотности тока от потерь на выход для лазерных диодов, изготовленных из гетероструктур с двумя напряженными квантовыми ямами с длинами волн излучения $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ (1) и $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (2) и одной ненапряженной квантовой ямой с длиной волны излучения $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ (3).

значения $\eta_i = 78\%$ [4]. Также полученная зависимость позволяет определить величину внутренних оптических потерь для изготовленных структур. Для структуры с $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ внутренние оптические потери составляют $\alpha_i = 2.6 \text{ cm}^{-1}$, а для структуры с $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ эта величина составляет $\alpha_i = 4.2 \text{ cm}^{-1}$. Эти значения также несколько хуже, чем лучшие известные в настоящее время $\alpha_i = 1.3 \text{ cm}^{-1}$ [4]. Отсюда следует, что дизайн лазерных структур может быть доработан с увеличения внутреннего квантового выхода и уменьшения оптических потерь в эмиттере *p*-типа.

Зависимость пороговой плотности тока от потерь на выход приведена на рис. 3. Минимальное значение пороговой плотности тока 260 A/cm^2

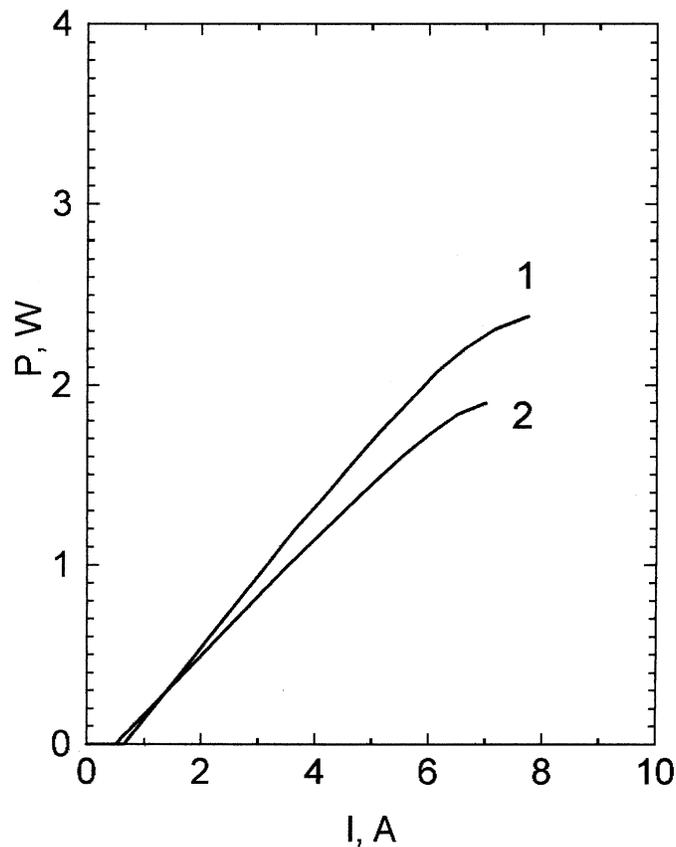


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики лазерных диодов с шириной полоска $W = 100 \mu\text{m}$, излучающих на длинах волн $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ (1) и $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (2) в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода $T = 20^\circ\text{C}$.

было получено в лазерных диодах с длиной волны излучения $1.3 \mu\text{m}$. Следует также отметить, что, несмотря на более высокие значения α_i и η_i , в лазерных диодах с длиной волны излучения $1.55 \mu\text{m}$ пороговая плотность тока составляла 280 A/cm^2 , что сравнимо с лучшими мировыми результатами [7].

Для сравнения на рис. 2 и 3 даны аналогичные зависимости для лазерных гетероструктур раздельного ограничения с с одной ненапряженной квантовой ямой толщиной 300 \AA , полученных методом жидкостной эпитаксии. Легко заметить значительное улучшение всех параметров лазерных структур, описанных в данной работе. Пороговые плотности тока нам удалось снизить более чем в 2 раза. Однако наиболее значимым с точки зрения увеличения оптической мощности является снижение величины внутренних оптических потерь, которые в обычной одноямковой ненапряженной РО ДГС структуре составляют 23 cm^{-1} .

Как известно, получение излучения большой мощности возможно только в лазерах большой длины резонатора при сохранении в них высоких значений дифференциальной квантовой эффективности. Сохранить высокое значение η_d при увеличении длины резонатора лазерного диода возможно только при малых значениях внутренних оптических потерь. Поэтому снижение внутренних оптических потерь в РО InGaAsP лазерных структурах с двумя напряженными квантовыми ямами до величины 2.6 и 4.2 cm^{-1} позволило в значительной степени повысить оптическую мощность излучения.

Рис. 4 иллюстрирует ватт-амперные характеристики лазерных диодов с $\lambda = 1.3$ и $1.55 \mu\text{m}$ в непрерывном режиме излучения при температуре теплоотвода $T = 20^\circ\text{C}$. Длина лазерных диодов была 1.9 и 1.2 mm , при этом удалось сохранить значение дифференциальной квантовой эффективности 40 и 33% соответственно для структур с $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ и $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Дальнейшее увеличение длины резонаторов было нецелесообразно из-за достаточно высоких внутренних потерь, которые приводили к снижению η_d . Загиб ватт-амперной характеристики, связанный с разогревом активной области, наступил при токе накачки $6\text{--}8 \text{ A}$, что, по нашему мнению, связано с последовательным сопротивлением в наших структурах $R_s = 0.45 \Omega$.

Таким образом, в результате проведенной работы получены лазерные диоды с оптической мощностью 2.4 и 1.9 W , излучающие в непрерывном режиме на длине волны 1.3 и $1.55 \mu\text{m}$ соответственно. Для изготовления лазерных структур использована технология МОС-гидридной эпитаксии твердых растворов InGaAsP на подложках InP n -типа. В структурах достигнуты низкие значения внутренних оптических потерь $2.6\text{--}4.2 \text{ cm}^{-1}$.

Работа поддержана МНТП России "Физика твердотельных наноструктур", гранты 97–1035, 99–2038, 99–2037.

Список литературы

- [1] *Wade J.K., Mawst L.J., Botez D., Nabiev R.F., Jansen M., Morris J.A.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 4.
- [2] *Wang J., Smith B., Xie X., Wang X., Burnham G.T.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 1525.
- [3] *Al-Muhanna A., Mawst L.J., Botez D., Garbuzov D.Z., Martinelli R.U., Connolly J.C.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 73. P. 1182.
- [4] *Garbuzov D., Xu L., Forrest S.R., Menna R., Martinelli R., Connolly J.C.* // Electron. Lett. 1996. V. 32. P. 1717.
- [5] *Garbuzov D.Z., Antonishkis N.Yu., Bondarev A.D., Gulakov A.B., Zhigulin S.N., Katsavets N.I., Kochergin A.V., Rafailov E.V.* // IEEE J. Quantum Electron. 1991. V. 27. P. 1531.
- [6] *Голикова Е.Г., Дураев В.П., Козиков С.А., Кригель В.Г., Лабутин О.А., Швейкин В.И.* // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. С. 85.
- [7] *Tsang W.T., Choa F.S., Wu M.C., Che Y.K., Sergent A.M., Sciortino P.F., Jr.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 2610.