

КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ
InGaAsP/GaAs ($\lambda=0.86\div 0.78$ мкм)
ЛАЗЕРЫ РАЗДЕЛЬНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ
($J_{\text{п}}=100$ А/см², КПД=59 %)

Алфёров Ж. И., Антонишкис Н. Ю., Арсентьев И. Н., Гарбузов Д. З.,
Колышкин В. И., Налет Т. А., Стругов Н. А., Тихунов А. В.

Сообщается о получении модифицированным методом жидкофазной эпитаксии InGaAsP/GaAs-лазеров раздельного ограничения, пороговые плотности тока в которых являются наиболее низкими из наблюдавшихся когда-либо для инжекционных лазеров (300 К). По мощности непрерывного излучения (~1.7 Вт) и КПД преобразования электрической энергии в световую (59 % с учетом излучения на два зеркала) эти лазеры находятся на уровне лучших AlGaAs/GaAs-лазеров, изготовленных методом молекулярной или газофазной эпитаксии.

В работе [1] впервые сообщалось об изготовлении новым вариантом метода жидкостной эпитаксии InGaAsP/GaAs-лазеров раздельного ограничения тонкими ($d_a \approx 200$ Å) активными областями. Там же было высказано предположение, что такие лазеры, возможно, смогут конкурировать с AlGaAs/GaAs-излучателями даже в традиционной для последних области спектра, соответствующей $\lambda=0.78\div 0.86$ мкм. Результаты дальнейших исследований в области совершенствования жидкофазного метода выращивания квантово-размерных InGaAsP/GaAs-структур, исследования их люминесцентных свойств и разработок лазеров на основе таких структур изложены в работах [2-5].

В настоящей работе, представляющей собой завершение первого этапа этих исследований, будут приведены данные о пороговых плотностях тока и мощностных характеристиках квантово-размерных InGaAsP/GaAs-лазеров, свидетельствующие о том, что выдвинутое в работе [1] предположение теперь уже может рассматриваться как утверждение.

Как и ранее [1-5], лазерные гетероструктуры получались в варианте метода жидкостной эпитаксии, при котором выращивание тонких слоев осуществляется в процессе быстрого протягивания подложки под расплавом, заключенным в узком вертикальном зазоре. В качестве подложек использовались пластины *n*-GaAs с $N_D=10^{18}$ см⁻³, ориентированные в направлении $\langle 111 \rangle$. Ширина запрещенной зоны для слоев, входящих в состав лазерной гетероструктуры, и положение квантово-размерных подзон в активной области показаны рис. 1, а-в. Как видно из рис. 1, квантово-размерные структуры раздельного ограничения (КР РО) состоят из широкозонных $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ -эмиттеров *n*- и *p*-типа проводимости, легированных соответственно Te и Zn; нелегированной активной области толщиной около 100 Å, материал которой либо был близок по составу к GaAs (рис. 1, б, $\lambda=0.86$ мкм), либо представлял собой четверные твердые растворы $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ с x и y порядка 0.9 и 0.8, что обеспечивало генерацию в области $\lambda=0.78\div 0.82$ мкм; нелегированных волноводных слоев $n\text{-In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ с $x=0.7$, $y=0.5$ для структуры с активной GaAs-областью (рис. 1, б) и с $x=0.6$, $y=0.2$ для второго типа структур с $\lambda=0.78\div 0.82$ мкм.

Верхний *p*- $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ -эмиттер выращивался из нескольких расплавов, имевших различное содержание цинка, что обеспечивало совпадение *p*-*n*-

перехода с границей эмиттера — волноводный слой или смещение его положения на $0.1 \div 0.2$ мкм от этой границы в сторону эмиттера [1]. На часть структур наносились сплошные омические контакты и из них изготавливались четырехсклоотые лазерные образцы и пыленные лазеры с различной длиной резонатора. Из другой части структур с помощью изоляции SiO_2 [3] изготавливались полосковые лазеры с шириной полоски 60 и 200 мкм. Для всех типов лазеров в качестве омических контактов были использованы многослойные покрытия — $\text{Au} : \text{Ge} : \text{Au}$ к n -области и $\text{Zn} : \text{Au} : \text{Au}$ к p -области. Последовательное удельное сопротивление лазерных диодов не превышало

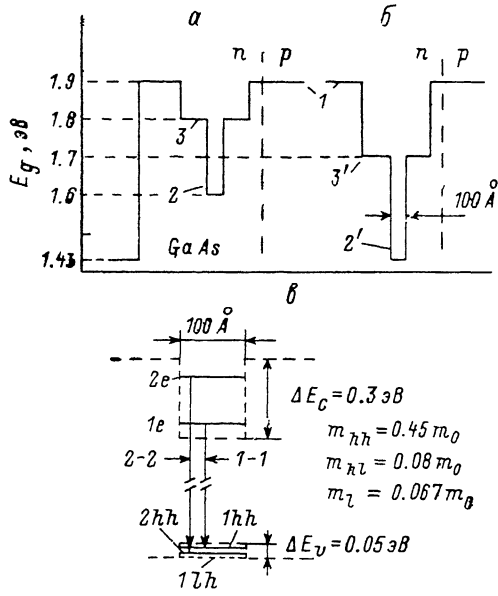


Рис. 1. Диаграммы ширин запрещенных зон для слоев, входящих в лазерные квантово-размерные $\text{InGaAsP}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры с раздельным ограничением.

a — гетероструктуры с длиной волны генерации $\lambda_T = 0.78 \div 0.82$ мкм; 1 — $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$, 2 — $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.94}\text{As}_{0.87}\text{P}_{0.13}$, 3 — $\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}_{0.17}\text{P}_{0.83}$; b — гетероструктура с длиной волны генерации $\lambda_T = 0.86$ мкм; 1 — $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$, 2' — $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ с E_g , близкой к GaAs , 3' — $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.74}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.53}$; e — зонная схема двумерной активной области.

в качестве омических контактов были использованы многослойные покрытия — $\text{Au} : \text{Ge} : \text{Au}$ к n -области и $\text{Zn} : \text{Au} : \text{Au}$ к p -области. Последовательное удельное сопротивление лазерных диодов не превышало

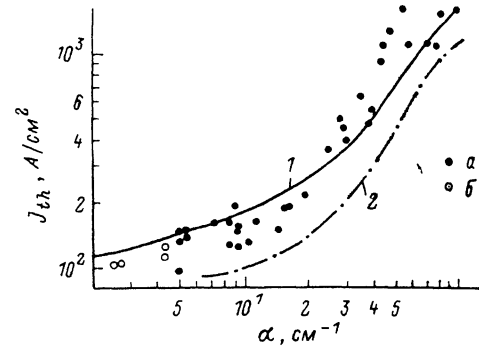


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические зависимости пороговой плотности тока от потерь на выходе $\left[\alpha = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right]$ для лазеров с $\lambda_T = 0.86$ мкм.

1 и 2 рассчитаны соответственно для $\tau_{in} = 7 \cdot 10^{-14}$ и 10^{-12} с. Экспериментальные точки: a — лазеры без зеркала, b — с зеркалом Si/SiO_2 ; $T = 300$ К, $d = 100$ Å.

$2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Перед монтажом на одно из зеркал нескольких лазерных диодов было нанесено шестислойное Si/SiO_2 диэлектрическое зеркало, у которого коэффициент отражения для генерируемого излучения был не менее 90 %.

Пайка диодов осуществлялась p -стороной вниз на медные теплоотводы, покрытые никелем и индием. Затем лазер с теплоотводом устанавливался на микрохолодильник, и проводились исследования пороговых и мощностных характеристик при температурах 10 и 20 °С в импульсном ($\tau = 0.5$ мкс, $f = 4$ кГц) и непрерывном режимах.

Таблица 1

Минимальные пороговые плотности тока, полученные в квантово-размерных $\text{InGaAsP}/\text{GaAs}$ -лазерах раздельного ограничения

λ , мкм	Четырехсклоотые		Пыленные				Полосковые			
	№ партии	J_{th} , А/см ²	№ партии	L , мм	W , мкм	J_{th} , А/см ²	№ партим	W , мкм	L , мм	J_{th} , А/см ²
0.86	2363-2	90	2-2480-2	2	200	100*	13-2463-1	60	1.13	155*
	2480-2	79	17-2480-2	2	200	98				
0.82	2510-2	109					9-2510-2	200	1.42	176*
0.78	2280-2	124					5-2452-1	200	1.93	230

Примечание. * Данные относятся к образцу с напыленным диэлектрическим зеркалом.

Лучшие результаты, полученные при измерении пороговых плотностей тока, сведены в табл. 1. Значения пороговых плотностей тока ≈ 100 А/см², полученные для пиленых образцов ($\lambda=0.86$ мкм) с малыми потерями на выход, являются наиболее низкими из наблюдавшихся когда-либо до сих пор для инжекционных лазеров. Зависимость пороговой плотности тока от потерь на выход, показанная на рис. 2, будет подробно проанализирована в следующей за этой работе [6]. Повышение порогов для лазеров с более широкозонными составами твердых растворов в активной области ($\lambda=0.82 \div 0.78$ мкм; табл. 1) обусловлено уменьшением фактора оптического ограничения и увеличением

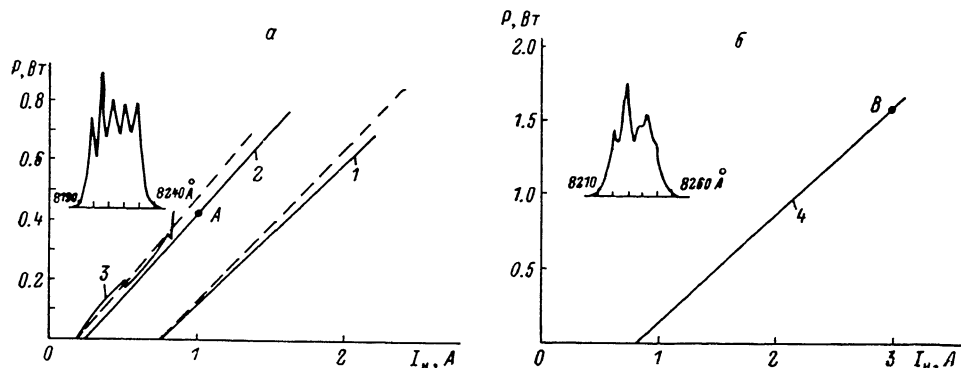


Рис. 3. Ваттамперные характеристики для лучших полосковых квантово-размерных InGaAsP/GaAs-лазеров раздельного ограничения со спектрами излучения.

Образцы: а) 1 — 5-2452-2 ($L=1.93$ мм, $W=200$ мкм, $\lambda_r=0.78$ мкм); 2 — 14-2510-1 ($L=1.46$ мм, $W=60$ мкм, $\lambda_r=0.82$ мкм); 3 — 3*-2463-2 (диэлектрическое зеркало) ($L=1.12$ мм, $W=60$ мкм, $\lambda_r=0.86$ мкм); на вставке — спектр в точке А, $I_n=1$ А, $P=0.42$ Вт; б) 4 — 12-2510-2 ($L=1.1$ мм, $W=200$ мкм, $\lambda_r=0.82$ мкм); на вставке — спектр в точке В, $I_n=3.0$ А, $P=1.6$ Вт.

потерь, связанных с поглощением в широкозонных легированных эмиттерах.

Ваттамперные характеристики лучших полосковых лазеров совместно с их спектрами излучения приведены на рис. 3, а, б. Основные параметры этих лазеров приведены в табл. 2. Кривые 1, 2, 3 рис. 3, а относятся к образцам с длиной волны генерации соответственно 0.78, 0.82, 0.86 мкм. Для лазера с $\lambda=0.82$ мкм (кривая 2) с шириной полоска 60 мкм была получена наибольшая мощность излучения с единицы длины зеркала ~ 12.5 мВт/мкм. При максимальной мощности излучения КПД для него составлял 52 % (на оба зеркала). Полуширина спектра у этого образца при токе 1 А была ~ 32 Å.

Лучший по эффективности из лазеров с зеркалами (рис. 3, кривая 3) имел КПД=29 % на одно зеркало при непрерывной мощности излучения около 400 мВт. Незначительное увеличение мощности в лазере с диэлектрическим зеркалом по сравнению с результатами для лазеров без дополнительных зеркал указывает на то, что есть основания надеяться на получение лучших результа-

Таблица 2

Основные параметры квантово-размерных InGaAsP/GaAs-лазеров, мощностные характеристики которых представлены на рис. 3, а, б

№ кривой на рис. 3	№ образца	λ , мкм	L , мм	W , мкм	η_d , %	КПД, % (I , U , P)
1	5-2452-2	0.78	1.93	200	68	37 (2.4 А, 1.85 В, ~ 1.4 Вт)
2	14-2510-1	0.82	1.46	60	76	52 (1.6 А, 1.85 В, ~ 1.55 Вт)
3	3*-2463-2	0.86	1.12	60	44	29 (0.8 А, 1.72 В, ~ 0.4 Вт)
4	12-2510-2	0.82	1.1	200	92	59 (3.1 А, 1.80 В, ~ 3.32 Вт)

Примечание. * Образец с напыленным диэлектрическим зеркалом.

тов в дальнейших экспериментах при нанесении зеркал на более тщательно выбранные исходные образцы.

Для лучшего по эффективности ($\eta_d=92\%$) и коэффициенту полезного действия (КПД=59%) лазера без диэлектрического зеркала с шириной полоска 200 мкм и длиной резонатора 1.1 мм измерения ваттамперных характеристики в непрерывном режиме были проведены до тока 3.1 А (рис. 3, б). При этом значении тока была зарегистрирована рекордная мощность излучения с одного зеркала — более 1.7 Вт. Полуширина спектра для этого лазера на токе 3 А была порядка 27 Å.

Для большинства из исследованных лазеров импульсные и непрерывные ваттамперные характеристики мало различались вплоть до максимальных значений токов (рис. 3, а, штриховые и сплошные кривые). Малый разогрев активной области и большой коэффициент преобразования электрической мощности в световую обусловлены использованием лазеров с очень большой длиной резонаторов (≥ 1 мм), у которых, как видно из табл. 2, тем не менее сохраняются высокие ($\sim 90\%$) значения дифференциальной эффективности. Эта особенность является характерным свойством правильно изготовленных лазеров раздельного ограничения, у которых величины внутренних потерь могут быть на порядок меньше, чем у лазеров на основе обычных двойных гетероструктур.

Очевидно, что благодаря низкому последовательному и термическому сопротивлению при работе в режиме заданной высокой мощности излучения лазеры с длинным резонатором должны обладать большими КПД и надежностью, чем короткое лазерные диоды. Сопоставление с литературными данными [7, 8] показывает, что по большинству параметров рассматриваемые InGaAsP/GaAs-лазеры находятся на уровне (а по некоторым параметрам и выше) лучших достижений для однополосковых квантово-размерных AlGaAs/GaAs-лазеров, изготовленных методом молекулярной и металлоорганической эпитаксии.

Мы полагаем, что преимущества используемых нами InGaAsP/GaAs-гетероструктур, связанные со 100%-м внутренним квантовым выходом излучательной рекомбинации в квантово-размерной активной области [9, 10] и отсутствием легко окисляющихся соединений алюминия, еще не полностью реализованы в лазерах, описанных в данной работе, и их параметры будут еще улучшены.

В заключение авторы благодарят Н. Д. Ильинскую, И. А. Мокину за помощь в изготовлении образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Алфёров Ж. И., Арсентьев И. Н., Вавилова Л. С., Гарбузов Д. З., Красовский В. В. — ФТП, 1984, т. 18, в. 9, с. 1655—1658.
- [2] Гарбузов Д. З., Арсентьев И. Н., Вавилова Л. С., Тикунов А. В., Тулашвили Э. В. — ФТП, 1985, т. 19, в. 1, с. 136—138.
- [3] Алфёров Ж. И., Арсентьев И. Н., Вавилова Л. С., Гарбузов Д. З., Тикунов А. В., Тулашвили Э. В. — Письма ЖТФ, 1985, т. 11, в. 4, с. 205—209.
- [4] Алфёров Ж. И., Антонишкис Н. Ю., Арсентьев И. Н., Гарбузов Д. З., Красовский В. В., Тикунов А. В., Халфин В. Б. — ФТП, 1987, т. 21, в. 1, с. 162—164; Алфёров Ж. И., Антонишкис Н. Ю., Арсентьев И. Н., Гарбузов Д. З., Тикунов А. В., Халфин В. Б. — ФТП, 1987, т. 21, в. 8, с. 1517—1519.
- [5] Алфёров Ж. И., Гарбузов Д. З., Арсентьев И. Н., Бер Б. Я., Вавилова Л. С., Красовский В. В., Чудинов А. В. — ФТП, 1985, т. 19, в. 6, с. 1108—1114.
- [6] Гарбузов Д. З., Тикунов А. В., Жигулин С. Н., Соколова З. Н., Халфин В. Б. — ФТП, 1988, т. 22, в. 6, с. 1035—1039.
- [7] Lindström C., Burnham R. D., Scifves D. R., Paoli T. L., Streifer W. — Electron. Lett., 1983, v. 19, N 3, p. 80—81.
- [8] Генкин В. И. и др. — Зарубежн. электрон. техн., 1986, в. 8 (303), с. 68.
- [9] Алфёров Ж. И., Антонишкис Н. Ю., Арсентьев И. Н., Гарбузов Д. З., Красовский В. В. — ФТП, 1986, т. 20, в. 12, с. 2145—2149.
- [10] Alferov Zh. I., Garbuzov D. Z. — In: 18 Int. Conf. Phys. Semicond. Stockholm, 1986, p. 136.