

Т а б л и ц а

$q, \text{кВт/см}^2$	$V, \text{м/с}$	$\alpha, \text{Вт/см}^2 \cdot \text{град}^*$	$\Delta P, \text{атм}$	$t, \text{час}^{**}$	$\Delta T, \text{°C}$
5.6	1.1	30			
7.1	1.9	47	< 3	50	< 130

\* Непосредственные измерения.

\*\* Устойчивость теплообмена в течение всего времени прогона.

до  $7 \text{ кВт/см}^2$  при незначительных перегревах теплообменника в течение 50 часов при умеренных расходах теплоносителя ( $v \approx 2 \text{ м/с}$ ,  $Q = 200 \text{ г/с}$ ). (см. таблицу).

Таким образом, нами экспериментально определены основные характерные закономерности устойчивого режима испарительно-конденсационной теплоотдачи в ВПЯМ, предложена качественная картина процесса интенсификации и экспериментально продемонстрирована возможность отведения тепловых нагрузок высокой плотности.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] А поллонов В.В., Б о р о д и н В.И., Г о н ч а р е н -  
к о В.И., О с т а н и н В.В., П р о х о р о в А.М., Х о -  
м и ч В.Ю., Х р и с т я н Е.В., Ч е т к и н С.А. - Изв.  
АН СССР, сер. физическая, 1984, т. 48, № 8, с. 1639-1643.
- [2] М а й о р о в В.А., В а с и л ь е в Л.Л. - ИФЖ, 1981,  
т. XL1, № 6, с. 965-969.
- [3] Н е с и с Е.И. Кипение жидкостей, М.: Наука, 1973.

Институт общей физики  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
2 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 3

12 февраля 1988 г.

МЕЗАПОЛОСКОВЫЕ  $InGaAsP/InP$  ( $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ )  
КВАНТОВОРАЗМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ РАЗДЕЛЬНОГО  
ОГРАНИЧЕНИЯ ( $J_{пор} = 380 \text{ А/см}^2$ ,  $P = 0.5 \text{ Вт}$ ,  $T = 18^\circ\text{C}$ )

Д.З. Г а р б у з о в, С.В. З а й ц е в, В.И. К о л ы ш к и н,  
Т.А. Н а л е т, А.В. О в ч и н н и к о в, И.С. Т а р а с о в

В работе продолжены исследования  $InGaAsP/InP$  ( $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ ) лазеров [1-3], полученных новым вариантом метода жидкостной эпитаксии, при котором тонкие активные области лазерных структур изготавливаются в процессе движения подложки под соответствующим

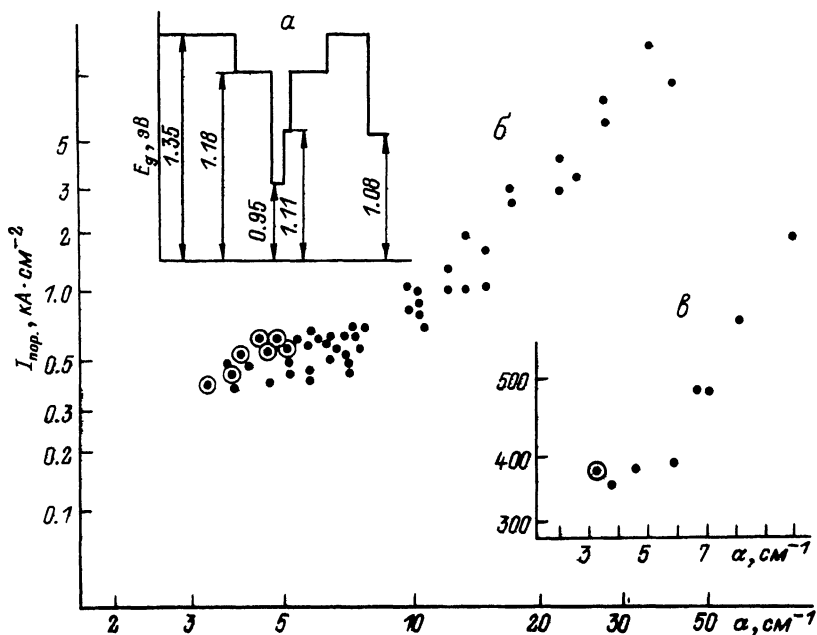


Рис. 1. а - схематическое изображение зонной диаграммы лазерной гетероструктуры, б - зависимость пороговой плотности тока от потерь на выход для мезаполосковых Р-1004, Р-787, Р-913 и зарощенных (Р-931) лазеров (толщина активных областей  $d_a=120, 190, 270$  и  $120 \text{ \AA}$ ), в - аналогичная зависимость, как функция потерь на выход в линейном масштабе (точки в кружках - лазеры с диэлектрическим покрытием на одном зеркале резонатора).

расплавом [4]. Недавние эксперименты показали, что выращивание после активной области дополнительного антистравливающего слоя позволяет уменьшить непланарность таких структур при  $d_a=300-500 \text{ \AA}$  и получить квантоворазмерные  $InGaAsP/InP$  гетероструктуры с  $d_a=100-300 \text{ \AA}$  [5, 6]. Особенности технологии, квантоворазмерные спектры фотолюминесценции и первые результаты, полученные для квантоворазмерных  $InGaAsP/InP$  лазеров с широким контактом описаны в предыдущих работах [5-7].

В данной работе впервые рассматриваются результаты исследования непрерывных полосковых лазеров, изготовленных из аналогичных структур с тонкими активными областями ( $d_a=100-300 \text{ \AA}$ ).

Зонная диаграмма лазерных гетероструктур приведена на рис. 1, а. Более подробное описание вопросов, касающихся легирования, и

методов изготовления лазеров мезаполосковых конструкций можно найти в [2]. Приводимые в настоящей работе данные относятся к лазерам, изготовленным из трех структур - Р-913, Р-787 и Р-1004, толщины активных областей которых соответственно составляют 270, 190 и 120 Å. Ширина полоска (активной области) в этих структурах равнялась 15-17 мкм. Мезаполосковые лазеры наиболее удобны для определения пороговых параметров структур, поскольку в них точно известна ширина рабочей области  $W$  и соответствуют шунтирующие токи по периферийным, не рабочим областям.

На рис. 1, б показана зависимость пороговой плотности тока от потерь на выход  $\alpha$  для мезаполосковых лазеров с различной длиной резонатора, изготовленных из трех упомянутых выше структур, а также для зарощенных лазеров с  $W=17$  мкм из структуры Р-931 с  $d_\alpha=120$  Å. Параметры зарощенных лазеров будут предметом более подробного обсуждения в следующей работе [8]. Здесь же их пороговые плотности тока приведены только для того, чтобы показать, что рассматриваемая зависимость  $J_{пор} = f(\alpha)$  носит достаточно общий характер и не является специфичной только для мезаполосковых лазеров. В зависимости пороговой плотности тока суммированы данные, полученные при импульсных измерениях ( $\tau = 1.5$  мкс,  $f = 10$  кГц), как для напаянных, так и не напаянных лазеров. Несколько экспериментальных точек, обведенных в кружки, относятся к образцам, на одно из зеркал которых нанесено шестислойное диэлектрическое зеркало  $Si/SiO_2$  с коэффициентом отражения для  $\lambda=1.3$  мкм не менее 90%. При рассмотрении данных, представленных на рис. 1, б, прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что для нескольких лазеров с наименьшими потерями на выход ( $\alpha > 5$  см<sup>-1</sup>) и максимальной длиной резонатора, значения пороговых плотностей тока не превышают 400 А/см<sup>2</sup>, а для наиболее низкорогового лазера  $J_{пор} = 380$  А/см<sup>2</sup>. Эти результаты, по-видимому, являются лучшим достижением для инжекционных лазеров с  $\lambda=1.3$  мкм. Увеличение потерь до значений  $\alpha > 7$  см<sup>-1</sup> приводит к резкому возрастанию пороговых плотностей тока в рассматриваемых квантоворазмерных лазерах. Чтобы лучше продемонстрировать характер зависимости  $J_{пор} = f(\alpha)$  в области  $\alpha < 10$  см<sup>-1</sup>, значения пороговых плотностей тока для лучших лазеров перестроены на рис. 1, в как функция потерь на выход в линейном масштабе. Как видно из рис. 1, б, в, при  $\alpha = 10$  см<sup>-1</sup> (длина резонатора с естественным зеркалом  $\approx 1$  мм) пороговые плотности тока в лазерных возрастают уже почти вдвое, а при  $\alpha = 50$  см<sup>-1</sup> - более чем на порядок по сравнению с образцами, у которых  $\alpha < 5$  см<sup>-1</sup>.

Сверхлинейное возрастание пороговой плотности тока с увеличением потерь в  $InGaAsP/InP$  лазерах с тонкими активными областями, обнаруженное уже в первых работах этого цикла [9, 10], было объяснено усилением в них компоненты тока, обусловленной Оже-рекомбинацией. В последующих работах [11, 12] было установлено, что такое же явление имеет место и в случае широкозонных квантоворазмерных  $AlGaAs/GaAs$  и  $InGaAsP/GaAs$  лазеров, и причиной его является насыщение усиления в активной области.

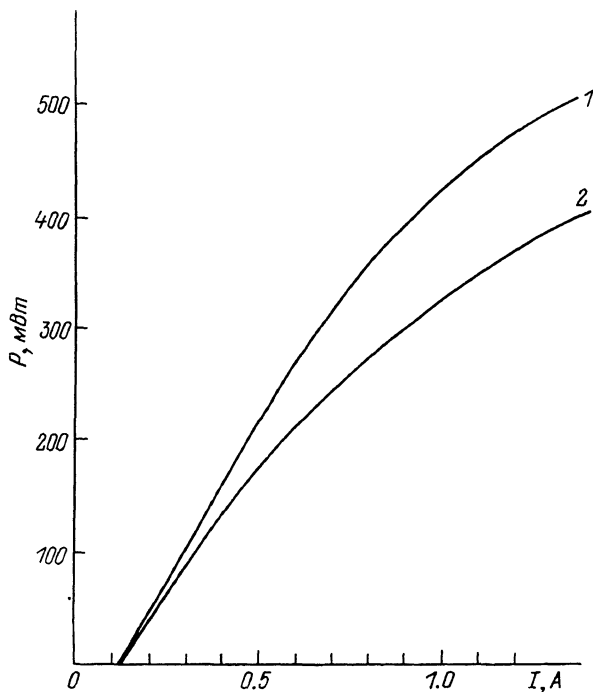


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики мезаполосковых лазеров в непрерывном режиме генерации. 1 - P-913-6,  $L = 1000$  мкм,  $W = 17$  мкм; 2 - P-913-54,  $L = 1380$  мкм,  $W = 17$  мкм с диэлектрическим зеркалом  $R > 90\%$ .

Однако проведенные нами расчеты [12, 13] показали, что при значениях потерь  $\alpha < 5 \text{ см}^{-1}$  ни эффект насыщения усиления, ни Оже-рекомбинация не должны влиять на пороговые плотности тока, и соответствующие значения  $J_{\text{пор}}$  должны были быть около 60–70 А/см<sup>2</sup>, то есть даже меньше, чем в квантоворазмерных лазерах с GaAs-активной областью. В то же время исследования эффективности фотолюминесценции [14] и электролюминесценции [7] квантоворазмерных InGaAsP/InP структур свидетельствуют о том, что при экспериментально полученных значениях пороговых плотностей тока  $\approx 400 \text{ А/см}^2$  скорость Оже-рекомбинации уже примерно в два раза превышает скорость излучательных переходов. Причиной значительного вклада Оже-рекомбинации в пороговый ток может являться то обстоятельство, что пороговые концентрации неравновесных носителей в реальных лазерах выше расчетных. По-видимому, это увеличение пороговых концентраций вызвано влиянием других типов потерь, которые в расчетах [12, 13] предполагались пренебрежимо малыми по сравнению с потерями на выход.

Как уже отмечалось [3], отличительной особенностью лазеров раздельного ограничения является сохранение высокой дифференциальной эффективности для образцов с большими длинами резонаторов. Именно в таких образцах получены максимальные мощности излучения в непрерывном режиме [3]. На рис. 2 кривые 1 и 2 иллюстрируют ватт-амперные характеристики двух лазеров с длинами резонаторов 1 и 1.4 мм, изготовленных из структуры Р-913. Эти образцы были напаяны на медные теплоотводы, которые во время измерений ватт-амперных характеристик были установлены на микрохолодильники со следящей системой, поддерживающей постоянное значение температуры теплоотвода ( $t = 0^\circ\text{C}$ ). Первый из этих лазеров имел наибольшую<sup>1</sup> из наблюдавшихся значений дифференциальную эффективность  $\eta_d = 45\%$  на одно зеркало. При пятнадцатикратном превышении пороговой плотности ( $I = 1.5 \text{ A}$  и  $U = 2.20 \text{ В}$ ) мощность непрерывного излучения с каждого зеркала была более 400 мВт, общий коэффициент преобразования электрической мощности в световую при четырехкратном превышении пороговой плотности составлял 50%.

Кривая 2 на рис. 2 демонстрирует лучшие результаты для одного из лазеров с диэлектрическим зеркалом. Линейному участку ватт-амперной характеристики этого образца соответствует значение дифференциальной эффективности 52%; при  $I = 1.5 \text{ A}$  и  $U = 1.72 \text{ В}$  мощность непрерывного излучения была свыше 500 мВт. Коэффициент преобразования электрической мощности в световую равен 38% при  $I = 400 \text{ mA}$ .

Сравнительно небольшая разница в величине мощности для первого и второго лазеров, по нашему мнению, объясняется тем, что для нанесения зеркала был выбран не лучший образец. Есть все основания полагать, что для образцов с диэлектрическими зеркалами могут быть получены мощности излучения в 1.5 раз более высокие, чем те, которые приведены на рис. 2.

Тем не менее, полученные величины непрерывной мощности и КПД являются рекордными для инжекционных лазеров с  $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ .

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что квантоворазмерные  $\text{InGaAsP/InP}$  гетероструктуры раздельного ограничения, полученные разработанным методом жидкостной эпитаксии, могут служить основой для изготовления полосковых непрерывных лазеров с рекордными порогами и мощностями излучения.

В заключение авторы благодарят Ж.И. Алферова за интерес к работе, Ю.В. Ильина за помощь в измерениях, Н.Д. Ильинскую, Т.Н. Дрокину за подготовку образцов, В.Б. Халфина за полезные обсуждения результатов.

---

<sup>1</sup> Типичные значения дифференциальной эффективности для лазеров данной партии составляли 25%.

- [1] Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Нивин А.Б., Овчинников А.В., Тарасов И.С. - ФТП, 1985, т. 19, № 3, с. 156-159.
- [2] Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ильинская Н.Д., Нивин А.Б., Овчинников А.В., Тарасов И.С. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, в. 22, с. 1345-1349.
- [3] Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Зайцев С.В., Нивин А.Б., Овчинников А.В., Стругов Н.А., Тарасов И.С. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 9, с. 552-557.
- [4] Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Арсентьев И.Н., Бер Б.Я., Вавилова Л.С., Красовский В.В., Чудинов А.В. - ФТП, 1985, т. 13, № 6, с. 1108-1114.
- [5] Арсентьев И.Н., Гарбузов Д.З., Конников С.Г., Погребницкий К.Ю., Светлокузов А.Е., Фалеев Н.Н., Чудинов А.В. - ФТП, 1986, т. 20, № 12, с. 2206-2211.
- [6] Гарбузов Д.З., Чалый В.П., Чудинов А.В., Светлокузов А.Е., Овчинников А.В. - ФТП, 1987, т. 21, № 3, с. 437-441.
- [7] Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Зайцев С.В., Нивин А.Б., Овчинников А.В., Тарасов И.С. - ФТП, 1987, т. 21, № 5, с. 826-829.
- [8] Гарбузов Д.З., Зайцев С.В., Колышкин В.И., Кулагина М.М., Мокина И.А., Нивин А.Б., Овчинников А.В., Тарасов И.С. - Письма в ЖТФ, 1988, т. 14, в. 2.
- [9] Евтихийев В.П., Гарбузов Д.З., Соколова З.Н., Тарасов И.С., Халфин В.Б., Чалый В.П., Чудинов А.В. - ФТП, 1985, т. 19, № 8, с. 1420-1423.
- [10] Гарбузов Д.З., Евтихийев В.П., Тарасов И.С., Чудинов А.В. - Тез. докл. а Ш Всесоюз. конф. Часть 2, Минск, 1985, с. 48.
- [11] Z o r y P.S., R e i s i n g e r A.R., et all. - Electron. Lett., 1986, v. 22, N 9, p. 475-476.
- [12] Гарбузов Д.З., Тикуннов А.В., Халфин В.Б. - ФТП, 1987, т. 21, № 6, с. 1085-1094.
- [13] Гарбузов Д.З., Евтихийев В.П., Карпов С.Ю., Соколова З.Н., Халфин В.Б. - ФТП, 1985, т. 19, № 3, с. 449-455.
- [14] A l f e r o v Zh.I., G a r b u z o v D.Z. - 18 International Conferense on the Physics of Semicondiontors, Sweden, Stocholm, 1986, p. 136.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
27 октября 1987 г.