

06.3; 07; 12

© 1990

ОСОБЕННОСТИ ЗАРАЩИВАНИЯ ПРОФИЛИРОВАННОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОДА В *InGaAsP/InP*  
ЛАЗЕРАХ С РОС

А.И. Гуриев, А.Г. Дерягин,  
К.Ю. Кижаяев, Д.В. Куксенков,  
В.И. Кучинский, С.А. Никишин,  
Е.Л. Портной, В.Б. Смирницкий

Эффективность обратной связи в лазерах с РОС является важнейшим параметром, определяющим все их основные характеристики: пороговый ток, мощность излучения, ширину линии генерации и т.д. В лазере с РОС величина коэффициента обратной связи  $K$  определяется глубиной и формой профиля встроенной дифракционной решетки (ДР) [1].

В работе [2] нами сообщалось о получении и исследовании низкопороговых инжекционных лазеров с РОС в системе *InGaAsP/InP* ( $\lambda = 1.5$  мкм). В этих гетероструктурах по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ) профиль зарощенной ДР имеет вид, представленный на рис. 1г. Для численной оценки величины  $K$  этот профиль можно аппроксимировать кусочно-параболической функцией вида (рис. 1):

$$\varphi(z) = \begin{cases} \frac{4u}{b^2} z^2, & |z| \leq \frac{b}{2} \\ u, & \frac{b}{2} \leq |z| \leq \frac{a}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Представляет интерес оценить величину  $K$  для структуры с ДР именно такой формы. Теоретическая оценка  $K$  была основана на решении уравнений поперечного сечения для трехслойного гофрированного диэлектрического волновода [3]. При этом коэффициент связи  $K$  для второго порядка брэгговской дифракции искался как Фурье-компонента функции связи  $A(z)$ :

$$A(z) = \frac{\dot{\beta}(z)}{2\beta} \quad (2)$$

Считая постоянную распространения  $\beta(z)$  линейно зависящей от толщины волновода в пределах глубины гофрировки, может записать:

$$\beta(z) = \beta_2 + (\beta_1 - \beta_2) \cdot \frac{\varphi(z)}{u} \quad (3)$$

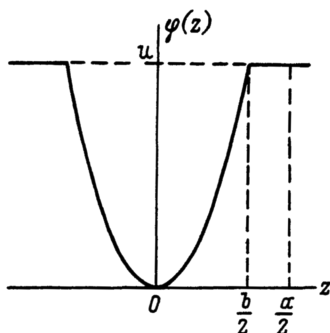
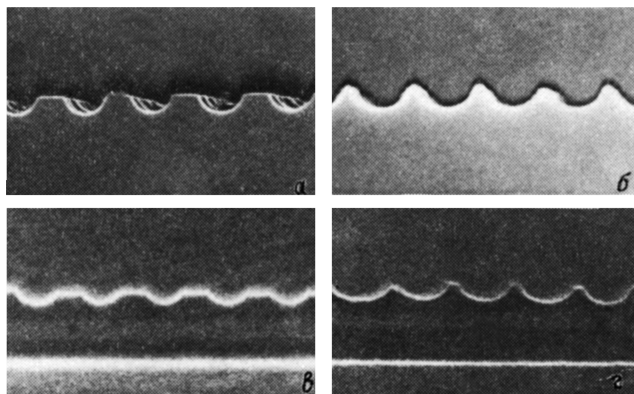


Рис. 1. Микрофотографии профилей ДР на поверхности волноводного  $InGaAsP$  слоя. Период ДР  $\alpha = 0.47$  мкм. а, б – профили исходных ДР для различных времен травления через фоторезистивную маску; в, г – профили зарощенных ДР в случае сильного (в) и слабого (г) подрастворения вершин гофра исходной ДР (б).

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – постоянные распространения для волноводов с толщинами, соответствующими  $z = 0$  и  $z = a/2$ .

Исходя из (1)–(3) получим для  $m$ -й Фурье-компоненты функции связи:

$$\alpha_m = \frac{4i}{\pi \cdot m \cdot a} \cdot \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \cdot \left\{ \frac{1}{\xi} \cdot \cos \pi m \xi - \frac{1}{\pi m \xi^2} \cdot \sin \pi m \xi \right\}, \quad (4)$$

где  $\xi = b/a$ . На рис. 2 представлены результаты расчета зависимости коэффициента  $K$  ( $K = a_2$ ) от параметра  $\xi$  для РО ДГС с характерными толщинами и составом слоев. Заметим, что максимальные значения эффективности обратной связи достигаются при  $\xi > 0.85$  (рис. 2).

Это означает, что для получения в лазере максимальной эффективности РОС необходимо иметь в нем встроенную ДР максималь-

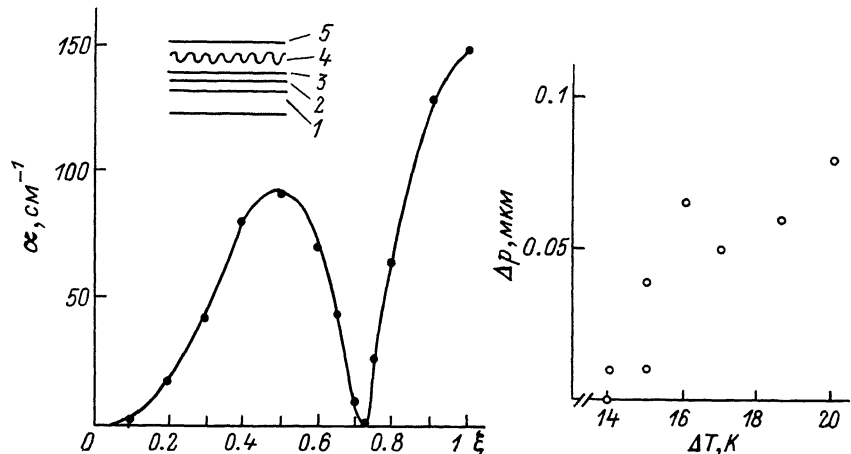


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $K$  от величины соотношения  $b/a$  (см. рис. 1, г) для  $\text{InGaAsP}/\text{InP}$  РО ДГС: 1 -  $p\text{-InP}$  подложка; 2, 4 - волноводные  $\text{InGaAsP}$  слои ( $\lambda = 1, 3$  мкм); 3 - активный  $\text{InGaAsP}$  ( $\lambda = 1,55$  мкм) слой, 5 -  $r\text{-InP}$  эмиттер.

Рис. 3. Зависимость величины подрастворения вершин гофра от величины переохлаждения  $\Delta T$  раствора-расплава  $\text{In} + \rho$  при скорости перемешивания раствора-расплава  $V_n = (65 \pm 5)$  см/с.

ной глубины с минимальным „плато“ на вершине штриха. На стадии изготовления ДР методом голографической фотолитографии эта задача решается соблюдением соответствующих условий химического травления поверхности полупроводника через фоторезистивную маску. На стадии же заравнивания необходимо минимизировать степень подрастворения вершин гофра раствором-расплавом.

Упомянутое подрастворение обусловлено термодинамической неравновесностью системы многокомпонентная твердая фаза (слой  $\text{InGaAsP}$ ) - бинарная жидкая фаза (переохлажденный расплав  $\text{In} + \rho$ ) и происходит преимущественно на вершинах гофра из-за анизотропии скоростей роста-растворения для различных кристаллографических направлений.

Одновременно с этим на стадии заравнивания ДР методом ЖФЭ необходимо решить задачу стабилизации условий роста в каждой точке поверхности подложки. В традиционной схеме ЖФЭ, использующей кассеты сдвигового типа, при совмещении подложки и переохлажденного раствора-расплава ( $\Delta T < \Delta T_c$ ) в последнем возникает неконтролируемое перемешивание, а также происходит изменение краевого угла смачивания по мере перемещения раствора-расплава по подложке [4]. Перечисленное определяет невоспроизводимость подрастворения вершин гофра как в одном процессе

(от точки к точке поверхности в направлении перемещения раствора-расплава), так и от процесса к процессу. К тому же при использовании для зарашивания профилированной поверхности растворов-расплавов  $In+P$  с переохлаждением, близким к критическому,<sup>1</sup> в традиционной схеме ЖФЭ неконтролируемое перемешивание сопровождается объемной кристаллизацией, усиливающей нестабильность доставки вещества к зарашиваемой поверхности.

Нами было показано [5], что применение принудительного перемешивания раствора-расплава при ЖФЭ в системе  $InGaAsP/InP$  позволяет стабилизировать и минимизировать величину переходного слоя на всей поверхности подложки. Поскольку процесс подрастворения гофрированной поверхности обусловлен теми же физико-химическими причинами, что и процесс образования переходного слоя, в настоящей работе эта техника ЖФЭ была применена для зарашивания ДР (рис. 1, в) из растворов-расплавов  $In+P$  с  $\Delta T \geq \Delta T_c$ . Приведенные на рис. 3 экспериментальные данные свидетельствуют о том, что величина критического переохлаждения раствора-расплава  $In+P$  при  $T = 870$  К составляет  $\Delta T_c \approx (13-14)$  К. Наилучшая стабильность величины подрастворения вершин гофра как в одном процессе, так и от процесса к процессу, была достигнута при скорости перемешивания раствора-расплава  $V_{\pi} = (65 \pm 5)$  см/с и переохлаждении, близком к критическому (рис. 3).

По данным спектральных измерений, коэффициент обратной связи  $K$  для лазерных диодов, изготовленных из гетероструктуры, профиль которой изображен на рис. 1, г, составляет  $K = 120$  см<sup>-1</sup>. При этом разброс значений  $K$  от образца к образцу не превышает  $10$  см<sup>-1</sup>. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают эффективность примененной технологии зарашивания ДР. Расчет по формуле (4) дает для той же гетероструктуры величину  $K = 103$  см<sup>-1</sup>, что подтверждает применимость использованной методики расчета для оценки эффективности РОС в реальных гетероструктурах.

В заключение авторы выражают признательность С.Ю. Карпову за полезные обсуждения работы.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Streifer W., Scifres D.R., Burnham R.D. // IEEE J. of Quant. El. 1975. V. QE-11. N 11. P. 867-873.
- [2] Алферов Ж.И., Кижанов К.Ю., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Никишин С.А.,

<sup>1</sup> Точно поддержать величину переохлаждения, близкую к критической, при ЖФЭ из раствора-расплава  $In+P$  достаточно трудно из-за неконтролируемого испарения фосфора из расплава на этапе гомогенизации. Достоверные литературные данные о величине  $\Delta T_c$  для расплава  $In+P$  при  $T = 870-920$  К авторам неизвестны.

Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 9. С. 513-517.

- [3] Мартынов Н.Н. // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 9. С. 1851-1861.
- [4] Алферов Ж.И., Бер Б.Я., Кижеев К.Ю., Никишин С.А., Портной Е.Л. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 16. С. 961-968.
- [5] Кижеев К.Ю., Кучинский В.И., Никишин С.А., Погребницкий К.Ю., Смирницкий В.Б., Фалеев Н.Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 3.

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

Поступило в Редакцию  
14 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 8

26 апреля 1990 г.

07; 08; 12

© 1990

## АКУСТОСПТИЧЕСКИЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Л.В. Балакин, В.И. Балакшии,  
Е.В. Цукерман

Датчики волнового фронта применяются в лазерной физике, адаптивной оптике, оптических системах неразрушающего контроля и т.д.

В настоящее время созданы датчики волнового фронта с высоким пространственным разрешением и в реальном масштабе времени на основе акустооптических разветвляющих устройств (АРУС) [1]. В АРУС различные точки пространства волнового фронта анализируются бегущим акустическим импульсом (цугом), на котором дифрагирует исследуемая световая волна. При этом выходной сигнал фотоприемника, регистрирующего дифрагированное излучение, содержит информацию о локальных направлениях волновой нормали.

В датчиках с узкоапертурным приемником, регистрирующих лишь часть дифрагированного излучения, локальное направление волновой нормали световой волны однозначно определяется положением дифрагированного пятна в фокальной плоскости выходной линзы [2]. В датчиках с широкоапертурным приемником, регистрирующих все дифрагированное излучение, используется зависимость интенсивности дифрагированного света от локального угла падения световой волны на акустический цуг [3]. В обоих типах датчиков частота