

06;07

## **Многоямковые лазерные гетероструктуры, полученные методом жидкостной эпитаксии**

© А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин,  
И.С. Тарасов, И.Н. Арсентьев, Б.Я. Бер, Ю.А. Кудрявцев,  
Ю.В. Ильин, Н.В. Фетисова

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

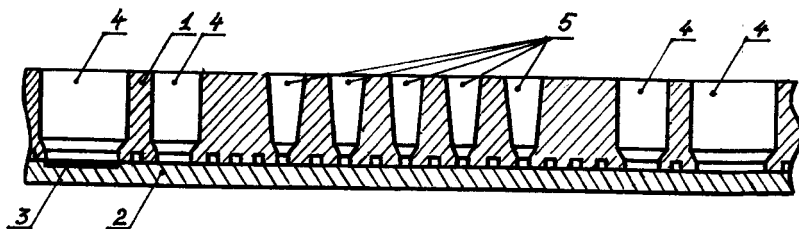
Поступило в Редакцию 10 февраля 1998 г.

Разработана технология многоямковых лазерных гетероструктур InGaAsP/InP методом жидкостной эпитаксии. С помощью глубинного профилирования на вторично-ионном масс-спектрометре исследованы профили распределения состава многоямковых лазерных гетероструктур.

Методом жидкофазной эпитаксии получены многоямковые лазерные гетероструктуры InGaAsP/InP с активными областями, имеющими длины волн излучения 1.3 и 1.55  $\mu\text{m}$ , и исследованы их излучательные характеристики.

Основные результаты в улучшении параметров лазерных диодов в системе твердых растворов InGaAsP/InP достигнуты при использовании свойств напряженных эпитаксиальных слоев InGaAs в лазерных гетероструктурах, изготовленных МОС-гидридной технологией [1,2]. В напряженных слоях InGaAs из-за упругой деформации изменяется зонная структура полупроводника, уменьшая Оже-рекомбинацию и оптическое поглощение, связанное с переходами дырок в спин-орбитально отщепленную зону [3], что и позволяет улучшить излучательные характеристики лазерных диодов.

Успехи в разработке технологии жидкостной эпитаксии тонких слоев твердых растворов InGaAsP [4] позволили применить ее при изготовлении лазерных гетероструктур. Для лазерных гетероструктур, полученных жидкостной эпитаксией и обладающих меньшей однородностью по толщине и составу, сохранение малых внутренних оптических потерь при увеличении длины резонатора становится актуальным. Применение многоямковой активной области [5] в лазерной структуре позволяет

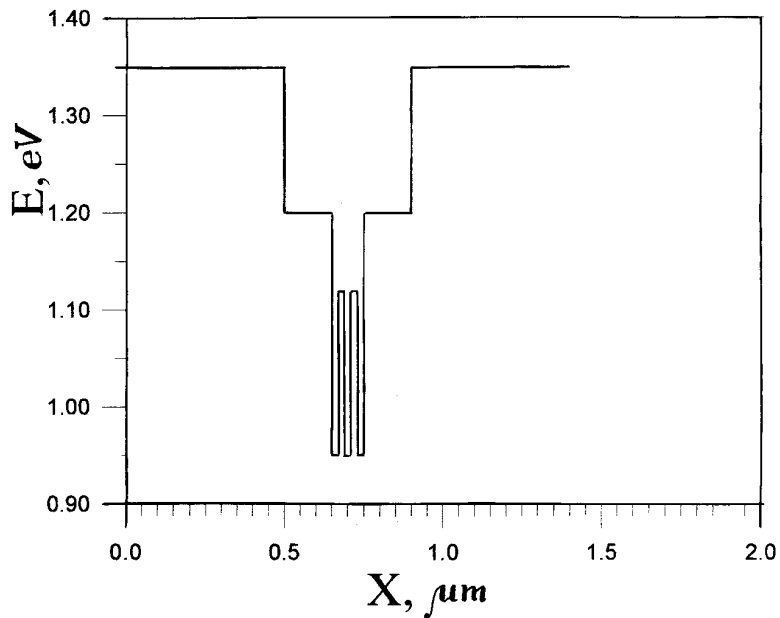


**Рис. 1.** Схема графитовой лодочки для жидкофазной эпитаксии многоямковых лазерных гетероструктур: 1 — неподвижный корпус кассеты; 2 — подвижный слайдер; 3 — подложка; 4 — ячейки для растворов-расплавов волноводных и эмиттерных слоев; 5 — ячейки для растворов-расплавов квантово-размерных слоев.

оптимально сочетать свойства тонких напряженных слоев InGaAs и гетероструктур раздельного ограничения с малыми оптическими потерями.

Поэтому цель настоящей работы состояла в разработке технологии жидкофазной эпитаксии многоямковых лазерных гетероструктур и исследовании их свойств.

В основу технологии изготовления многоямковых лазерных гетероструктур был положен один из вариантов получения тонких эпитаксиальных слоев методом жидкостной эпитаксии [6]. Основная его идея заключается в уменьшении времени контакта переохлажденного раствора-расплава с подложкой за счет увеличения скорости перемещения подложки относительно растворов-расплавов в ячейках уменьшенных размеров. Суть предложенного технологического подхода заключается в формировании многоямковой гетероструктуры за один процесс перемещения подложки относительно ячеек с растворами-расплавами, что обуславливает постоянную скорость перемещения подложки относительно всех ячеек и, как следствие, одинаковую толщину квантовых ям. Изменение толщин эпитаксиальных слоев различных составов достигается за счет изменения размеров ячеек, содержащих растворы-расплавы. Исходя из требований технологического процесса, была сконструирована графитовая кассета (рис. 1), позволяющая формировать многоямковую гетероструктуру, зонная диаграмма которой приведена на рис. 2. Профиль распределения состава многоямковой



**Рис. 2.** Схематическое изображение зонной диаграммы многоямковой лазерной гетероструктуры.

лазерной структуры по глубине исследовался с помощью глубинного профилирования на вторично-ионном масс-спектрометре (ВИМС) CAMECA IMS-4f. В качестве первичного пучка использовались ионы  $^{133}\text{Cs}^+$  с энергией 10 keV, что соответствовало кинетической энергии при подлете к мишени 5.5 keV при угле падения, отсчитанном от нормали к мишени,  $42^\circ$ . Первичный пучок с током 20 nA сканировал на мишени кратер размером  $400 \times 400 \mu\text{m}$ . Отбор вторичных ионов производился из центрального пятна диаметром  $60 \mu\text{m}$ . В качестве вторичных ионов были выбраны ионизованные кластеры  $x\text{Cs}$  ( $x = \text{Ga}, \text{In}, \text{As}, \text{P}$ ), что обеспечивало существенное подавление матричного эффекта при проведении количественного анализа [7,8]. Скорость ионного травления определялась по измерению глубины кратера с помощью механического профилометра DEKТАК.

Количественный анализ проводился с использованием относительных коэффициентов чувствительности  $RSF_{x\text{Cs}^+/\text{InCs}^+}$  ( $x = \text{In}; \text{Ga}; \text{As}; \text{P}$ ), нормированных на коэффициент чувствительности для кластера  $\text{InCs}^+$ . Относительная атомная концентрация  $C_x(\text{M})$  сорта  $x$  при стационарном режиме распыления матрицы состава  $\text{M}$  может быть записана как:

$$C_x(\text{M}) = \frac{I_{x\text{Cs}^+}(\text{M})/RSF_{x\text{Cs}^+/\text{InCs}^+}(\text{M})}{\sum I_{y\text{Cs}^+}(\text{M})/RSF_{y\text{Cs}^+/\text{InCs}^+}(\text{M})}, \quad (1)$$

где  $x, y = \text{In}, \text{Ga}, \text{As}, \text{P}$ ;  $I_{x\text{Cs}^+}(\text{M})$  регистрирует ток ионизированных кластеров  $x\text{Cs}^+$ . Тогда для матрицы  $\text{InP}$ , учитывая, что  $C_{\text{In}} = C_{\text{P}} = 0.5$ , имеем:

$$RSF_{\text{PCs}^+/\text{InCs}^+}(\text{InP}) = \frac{I_{\text{PCs}^+}(\text{InP})}{I_{\text{InCs}^+}(\text{InP})}. \quad (2)$$

Пренебрегая в первом приближении зависимостью относительных коэффициентов чувствительности от состава матрицы, мы получим для твердого раствора  $\text{M} = (\text{In}, \text{Ga})(\text{As}, \text{P})$  следующее соотношение:

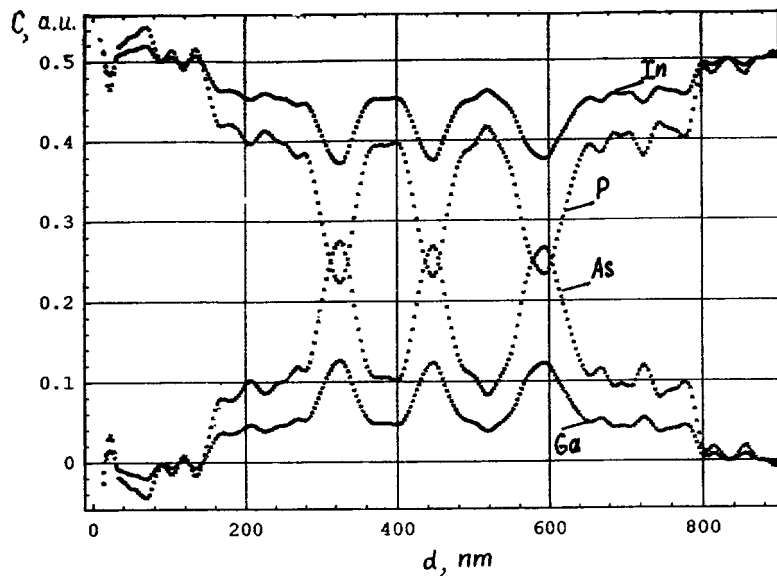
$$\frac{C_{\text{P}}(\text{M})}{C_{\text{In}}(\text{M})} = \frac{I_{\text{PCs}^+}(\text{M})}{I_{\text{InCs}^+}(\text{M})} \frac{I_{\text{InCs}^+}(\text{InP})}{I_{\text{PCs}^+}(\text{InP})}. \quad (3)$$

Кроме того, мы учтем, что условие изопериодичности твердых растворов  $(\text{In}, \text{Ga})(\text{As}, \text{P})$  лазерной гетероструктуры накладывает дополнительную связь концентраций  $C_{\text{In}}$  и  $C_{\text{P}}$  [9]:

$$C_{\text{P}} = \frac{1.9378 C_{\text{In}} - 0.5162}{0.9676 - 0.1244 C_{\text{In}}}. \quad (4)$$

Видно, что два условия (3) и (4) позволяют при профилировании лазерной ненапряженной структуры, которая содержит слой  $\text{InP}$ , использовать его как внутренний стандарт и, измеряя лишь отклонение токов двух аналитических кластеров  $\text{PCs}^+$  и  $\text{InCs}^+$ , оценить распределение по глубине всех четырех атомных компонентов.

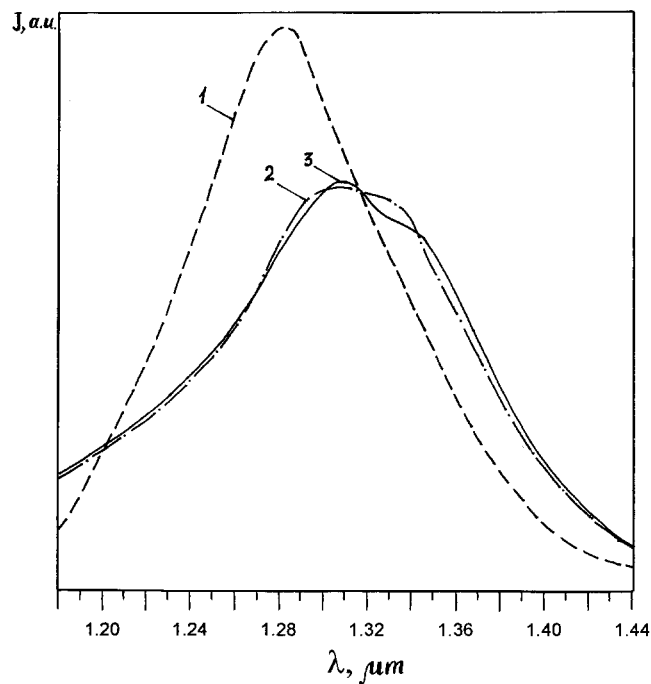
Профиль состава  $\text{InGaAsP/InP}$  лазерной гетероструктуры в относительных атомных концентрациях, измеренный с применением этой методики, приведен на рис. 3. Толщина эпитаксиальных слоев, образующих квантовые ямы, составляет  $100 \div 130 \text{ \AA}$ , толщина промежуточных слоев составляет аналогичную величину. Толщина переходных слоев составляет величину порядка  $40 \div 50 \text{ \AA}$ , что является близким к предельным



**Рис. 3.** ВИМС-профили состава In-Ga-As-P многоямковой фотолуминесцентной гетероструктуры ( $d$  — глубина травления).

значениям в эпитаксиальных слоях, полученных модифицированным методом жидкостной эпитаксии [6]. Поэтому получение более тонких, толщиной в несколько десятков ангстрем, эпитаксиальных слоев методом жидкостной эпитаксии затруднено.

Были также проведены исследования фотолуминесцентных свойств многоямковых гетероструктур. На рис. 4 приведены спектры ФЛ различных типов многоямковых гетероструктур. В гетероструктурах первого типа состав полупроводникового твердого раствора в квантовых ямах активной области был одинаков. В гетероструктурах второго типа ширина запрещенной зоны полупроводникового твердого раствора в квантовых ямах отличалась на величину  $\Delta E \cong 15 \text{ meV}$ . В гетероструктурах третьего типа были изготовлены две квантовые ямы, различающиеся по составу  $E_g$  на величину  $\Delta E \cong 30 \text{ meV}$ . Форма ФЛ спектров позволяет сделать вывод о наличии квантовых ям с различным составом твердой фазы.



**Рис. 4.** Спектры фотолуминесценции изотипных многоямковых гетероструктур: 1 — с одинаковым составом твердого раствора в активной области; 2 — отличающимся по составу на  $\Delta E_g = 15 \text{ meV}$ ; 3 — отличающимся по составу на  $\Delta E_g = 30 \text{ meV}$ .

На основе разработанной технологии получения многоямковых гетероструктур методом жидкостной эпитаксии были изготовлены лазерные многоямковые гетероструктуры с шириной запрещенной зоны в квантовых ямах от 0.8 до 0.95 eV. Из таких лазерных гетероструктур были изготовлены мезаполосковые лазеры по методике, подробно описанной в [4]. Ширина мезаполоскового контакта составляла  $\sim 5 \mu\text{m}$ , что обеспечивало генерацию на одной нулевой поперечной моде. Эффективная толщина активной области из трех квантовых ям составляла 600 Å. В лазерных диодах из структур с согласованными по параметру решетки эпитаксиальными слоями активной области удавалось повторить

характеристики одномодовых лазерных диодов с одиночными активными областями [4]. Отсюда следует, что конструктивное изменение лазерной гетероструктуры с внесением дополнительных гетерограниц не приводит к увеличению внутренних оптических потерь. Следовательно, разработанная методика жидкостной эпитаксии многослойных гетероструктур позволяет изготавливать двух-четырёхъямковые лазерные гетероструктуры.

Итак, в работе получены следующие результаты:

1. Разработана технология многоямковых лазерных гетероструктур InGaAsP/InP методом жидкостной эпитаксии.
2. Получены одномодовые мезаполосковые InGaAsP/InP лазерные диоды с многоямковой активной областью.

Авторы выражают благодарность за помощь в изготовлении образцов Т.Н. Дрокиной, Н.Д. Ильинской, Н.Ф. Кадошук и Е.А. Кухаревой.

Работа была выполнена при поддержке проекта № 96–2005 по МНТП "Физика твердотельных наноструктур".

## Список литературы

- [1] *Chen T.R., Eng L.E., Zhyang Y.H., Xu Y.J., Zaren H., Variv A.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 26. P. 2762–2763.
- [2] *Zah C.E., Bhat R., Pathak B., Caneau C., Favire F.J., Andreadakis N.C., Hwang D.M., Koza M.A., Chen C.Y., Lee T.P.* // Electron. Lett. 1991. V. 27. N 16, P. 1414–1415.
- [3] *Yokouchi N., Yamataka N., Iwai N., Kasukawa A.* // Electron. Lett. 1995. V. 31. N 2. P. 104–105.
- [4] *Иванов М.А., Ильин Ю.В., Ильинская Н.Д., Корсакова Ю.А., Лешко А.Ю., Лунев А.В., Лютецкий А.В., Мурашова А.В., Пихтин Н.А., Тарасов И.С.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 5. С. 70–75.
- [5] *Zah C.E., Bhat R., Favire F.J., Menocal S.G. Yz., Andreadakis N.C., Cheung K.W., Hwang D.M., Koza M.A., Lee T.P.* // IEEE J. Quantum Electron. 1991. V. 27. N 6. P. 1440–1450.
- [6] *Алферов 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. 1108–1113.
- [7] *Ghaseer H., Oechner H.* // Fresenius J. Anal. Chem. 1991. V. 341. P. 54–56.
- [8] *Абрамов А.В., Бер Б.Я., Дерягин Н.Г., Меркулов А.В., Третьяков Д.Н.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 3. С. 34–38.
- [9] *Kiphal E.* // J. Crystal Grows. 1984. V. 67. N 3. P. 441–457.