

## ПЕРЕХОД ОТ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПЕРВОГО ТИПА К ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ ВТОРОГО ТИПА В СИСТЕМЕ InAs/InAsSbP

Гусев О. Б., Бреслер М. С., Зотова Н. В., Стусь Н. М.

При исследовании гетероструктур в системе InAs/InAsSbP обнаружен переход от гетероструктур первого к гетероструктурам второго типа. Построена фазовая диаграмма состояний гетеропереходов этой системы, определяющая области реализации структур первого и второго типов в зависимости от состава четверного раствора. Исследование фотолюминесценции подтверждает существование двух типов гетероструктур. Наблюдалось стимулированное излучение на гетерогранице второго типа.

При разработке полупроводниковых приборов на основе гетероструктур важное значение имеет знание типа гетероперехода. В спектральной области 2.5—4 мкм для изготовления светодиодов, приемников излучения и лазеров большой практический интерес представляет система InAs/InAsSbP.

В настоящей работе впервые показано, что вследствие разной зависимости от состава ширины запрещенной зоны четверного раствора  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$  и положения края его валентной зоны относительно валентной зоны InAs гетеропереход на основе системы InAs/InAsSbP может быть как первого, так и второго типов. Построена фазовая диаграмма состояний гетероперехода  $\text{InAs}/\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ , определяющая области реализации гетероперехода первого и второго типов в зависимости от состава. Исследование фотолюминесценции подтверждает существование двух типов гетероструктур в этих областях. Наблюдалось стимулированное излучение на гетерогранице второго типа.

Построение фазовой диаграммы проводилось следующим образом: очевидно, что переход от гетероструктуры первого типа ко второму будет происходить при тех значениях  $x$  и  $y$ , когда  $\Delta E_g = \Delta E_v$ , где  $\Delta E_g$  — разность запрещенных зон четверного раствора и арсенида индия, а  $\Delta E_v$  — разрыв валентных зон между ними. Используя для определения ширины запрещенной зоны формулу из [1] и рассчитывая скачок валентных зон в линейном приближении, получим уравнение

$$x(E_g^B - E_g^A) + y(E_g^C - E_g^A) - 0.61(1-x)x - 0.89xy - 0.1(1-y)y = -x|\Delta E_v^{BA}| + y|\Delta E_v^{CA}|, \quad (1)$$

где  $E_g^A$ ,  $E_g^B$  и  $E_g^C$  — соответственно ширина запрещенной зоны InAs (0.425 эВ), InSb (0.235 эВ) и InP (1.416 эВ), а  $\Delta E_v^{BA}$  и  $\Delta E_v^{CA}$  — скачок валентных зон InSb (0.19 эВ) и InP (0.41 эВ) относительно InAs [2]. После подстановки указанных параметров зонной структуры уравнение (1) преобразуется к виду

$$y = \frac{0.61(1-x)}{0.58 + 0.11 - y - 0.89x} x. \quad (2)$$

На рис. 1 приведена фазовая диаграмма состояний гетероперехода  $n\text{-InAs}/p\text{-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ , основанная на решении уравнения (2). На этом же рисунке

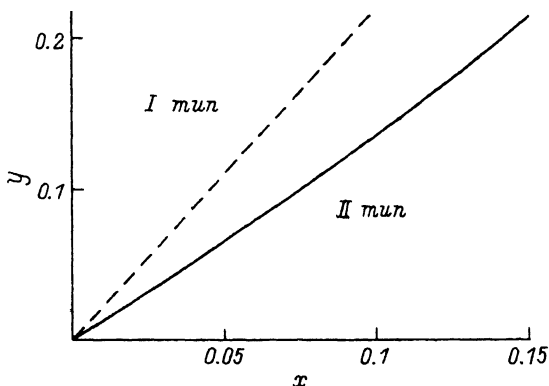


Рис. 1. Фазовая диаграмма состояний гетероперехода  $\text{InAs}/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y$ .

Штриховая линия — зависимость  $y = 2.2x$ , соответствующая равенству постоянных решетки арсенида индия и твердого раствора.

показана линия равенства постоянных решетки  $\text{InAs}$  и твердого раствора  $y = 2.2x$ . Эта линия находится в области гетероструктур первого типа; именно поэтому экспериментальные исследования относились в основном к этой области. Однако, как показано в [3], весьма малое рассогласование постоянных решетки ( $\Delta a/a \leq 10^{-3}$ ) удастся получить при  $x \sim 0.1$  и  $y$  в интервале  $0.1 - 0.16$ , т. е. в области гетероструктур второго типа.

Мы исследовали переход от первого типа ко второму типу в системе  $n\text{-InAs}/p\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y$  при  $x = 0.1$  и  $y$  в области  $0.122 - 0.155$ . На рис. 2 представлен расчет  $\Delta E_g$  ( $\text{InAsSbP} - \text{InAs}$ ) и  $\Delta E_v$  ( $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ ) в зависимости от  $y$ .

Как видно из рисунка, при  $x = 0.1$ ,  $y = 0.135$  разрыв валентных зон равен разности запрещенных зон. Очевидно, что справа от этой точки будет находиться область гетероструктур первого типа, слева — второго типа. На этом же рисунке приведены схемы энергетических зонных диаграмм для  $n-p$ -гетероструктуры в этих областях. Видно, что в области гетероструктур второго типа в отличие от области гетероструктур первого типа существует карман не только в валентной зоне, но и в зоне проводимости. Разность  $\Delta E_g - \Delta E_v$  дает глубину кармана в зоне проводимости. Особенности зонных диаграмм отчетливо проявляются в спектрах люминесценции.

Объектом исследования являлась гетерограница  $n\text{-InAs}/p\text{-InAsSbP}$  двойной гетероструктуры, обеспечивающей ограничение электромагнитной волны.

Эти структуры выращивались на подложке арсенида индия  $n$ -типа [4] (рис. 3). Для получения слоя  $p$ -типа твердого

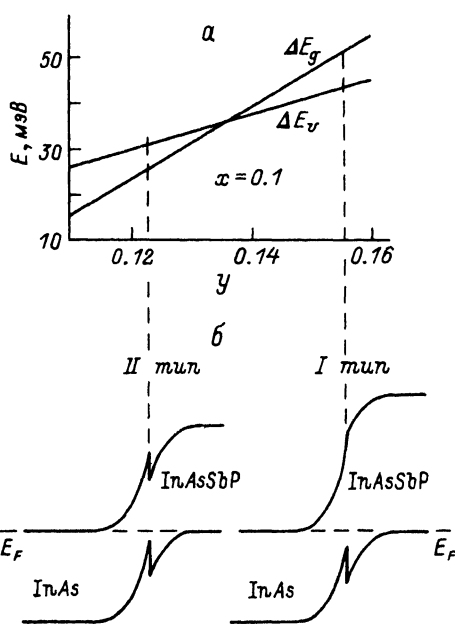
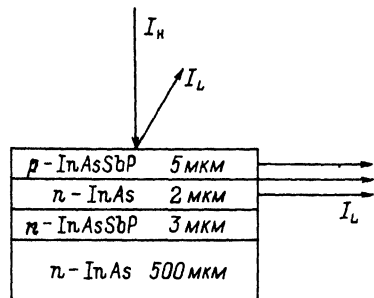


Рис. 2.

$a$  — зависимость  $\Delta E_g$  и  $\Delta E_v$  от содержания фосфора ( $y$ ); концентрация сурьмы зафиксирована ( $x \approx 0.1$ ).  $b$  — энергетические зонные диаграммы двух типов гетеропереходов для двух образцов, изображающие области существования гетеропереходов второго и первого типов.



го слоя  $p\text{-InAsSbP}$  образцов, находившихся непосредственно в жидком гелии при  $T = 1.8 \text{ K}$ .

Фотолюминесценция могла наблюдаться как со стороны четверного раствора  $\text{InAsSbP}$ , так и с торцевой стороны образца. На рис. 4 приведены спектры образцов с  $x = 0.1$ ,  $y = 0.122$  (а) и  $x = 0.1$ ,  $y = 0.155$  (б), снятые в геометрии на отражение. Общими для этих двух спектров являются линии  $n\text{-InAs}$  при энергиях 405 и 425 мэВ, соответствующие переходам зона—акцептор и зона—зона, а также линии четверного состава  $\text{InAsSbP}$ , положение которых хорошо согласуется с расчетом [1].

Отличительной особенностью спектра, приведенного на рис. 4, а, является линия при энергии, меньшей соответствующей переходу зона—акцептор  $n\text{-InAs}$ . Согласно предложенной модели, наблюдаемая линия в спектре обусловлена переходами на гетерогранице  $n\text{-InAs}/p\text{-InAsSbP}$ , а именно переходами неравновесных электронов из кармана в зоне проводимости на акцепторные состояния. В такой системе при гелиевых температурах вследствие вырождения легко создается инверсная заселенность и происходит усиление рекомбинационного излу-

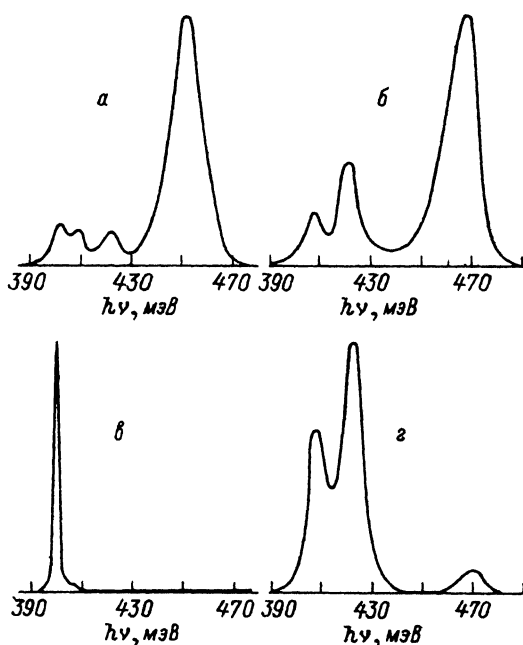


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции гетероструктур  $n\text{-InAs}/p\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y$ .

чения, распространяющегося вдоль гетерограницы (усиление интерфейсной линии).

Действительно, при наблюдении фотолюминесценции с торцевой стороны образца в спектре, соответствующем гетеропереходу второго типа, наблюдается практически только интерфейсная линия с интенсивностью, в несколько десятков раз большей, чем в геометрии на отражение (рис. 4, *в*). В спектре, соответствующем гетеропереходу первого типа, при той же мощности накачки наблюдается небольшое усиление излучения, отвечающего как переходу зона—акцептор, так и переходу зона—зона (рис. 4, *з*).

Таким образом, в настоящей работе показано, что в системе InAs/InAsSbP при изменении состава твердого раствора происходит переход от гетероструктур первого типа к гетероструктурам второго типа и определена фазовая диаграмма состояний указанных гетероструктур.

Авторы благодарны Б. П. Захарчене и А. А. Рогачеву за поддержку настоящей работы, И. Н. Ясиевич за плодотворное обсуждение полученных результатов и С. В. Литвинову за участие в экспериментах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Fukui T., Horikoshi Y. // Japan. J. Appl. Phys. 1981. V. 20. N 3. P. 387—391.
- [2] Electronic structure of semiconductor heterojunctions / Ed. by G. Margaritondo. Kluwer, Dordrecht, 1988. P. 20.
- [3] Конников С. Г., Матвеев Б. А., Попова Т. Б., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н., Уманский В. Е. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 3. С. 789—792.
- [4] Айдаралиев М. А., Зотова Н. В., Карандышев С. А., Матвеев Б. А., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 6. С. 329—331.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Получена 28.11.1991  
Принята к печати 4.12.1991