

06.2

© 1992

ПОЛУЧЕНИЕ УЗКОЗОННЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
 $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ МЕТОДОМ
 ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Р.Х. Акчурина, Т.В. Сахарова

Твердые растворы $InAs_{1-x}Sb_x$ вызывают значительный интерес как материал фотоприемных устройств для среднего и дальнего ИК-диапазона [1]. В последние годы достигнуты практические успехи в получении методами молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксии упругонапряженных сверхрешеток на их основе ($0.8 < x < 1.0$) с длинноволновым краем собственного оптического поглощения, лежащим в области $\lambda > 8$ мкм при 77 К [2, 3]. Уменьшения ширины запрещенной зоны (E_g) твердых растворов $InAs_{1-x}Sb_x$ можно добиться и введением в их состав висмута (по аналогии с $InSb < Bi >$ [4]), что должно также способствовать частичному уменьшению рассогласования периодов кристаллической решетки при росте эпитаксиальных слоев (ЭС) на подложках $InSb$.

В настоящей работе исследовали условия роста ЭС $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ на подложках $InSb$ (111) В с $\rho_{77K} = (3-5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) с использованием висмута в качестве растворителя. ЖФЭ проводили при температурах 390–450 °С в изотермическом режиме из растворов-расплавов, предварительно переохлажденных для предотвращения подрастворения подложки. Составы растворов-расплавов выбирали на основании расчета гетерогенных равновесий в системе $In-As-Sb-Bi$, а температуры их ликвидуса уточняли путем визуального наблюдения за растворением кристаллов твердого раствора на поверхности предварительно гомогенизированного и переохлажденного раствора-расплава при его последующем нагреве. Величина минимального переохлаждения (ΔT_0^{min}), необходимого для предотвращения подрастворения подложки $InSb$ четырехкомпонентным раствором-расплавом зависела от температуры эпитаксии и концентрации мышьяка в жидкой фазе и при получении ЭС состава $x = 0.88-0.95$ изменялась от 5 до 15 °С при $T_{эп} = 390-405$ °С и от 8 до 20 °С при $T_{эп} = 440-450$ °С. С увеличением исходного переохлаждения, при прочих равных условиях, концентрация антимонида индия в ЭС возрастала, что связано, очевидно, с уменьшением эффективного коэффициента распределения As вследствие увеличения скорости роста.

Состав ЭС определяли методом локального рентгеноспектрального анализа. Содержание Bi в ЭС оценивали методом массспект-

рометрии вторичных ионов с использованием в качестве эталона ЭС $InSb \langle Bi \rangle$; по результатам анализа не обнаружено различия в концентрации Bi в исследованных ($x=0.92-0.95$) и эталонных образцах. Основываясь на данных [5] по растворимости Bi в $InSb$, значение y оценивалось равным ~ 0.009 .

Непосредственно на подложках $InSb$ выращены ЭС состава $x=0.88-0.95$. Получить качественные ЭС $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ с $x < 0.88$ таким способом не удалось, так как для подавления подрастворения подложки в этом случае требовалось переохлождение раствора — расплава на величину более $25^\circ C$, приводившее к гомогенной кристаллизации в жидкой фазе и неконтролируемому изменению состава ЭС. Для выращивания ЭС $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ с $x < 0.88$ подложки $InSb$ защищали буферным слоем твердого раствора с большим значением x , при этом удалось получить гетеро-структуры с составом второго ЭС $0.82 < x < 0.88$.

Плотность дислокаций несоответствия вблизи гетерограниц, определенная по картинам травления косых шлифов, составила от $1 \cdot 10^7$ до $5 \cdot 10^7$ $см^{-2}$.

Спектры оптического пропускания гетероструктур, снятые при 77 К в диапазоне длин волн 4.5–25 мкм, представлены на рис. 1, а. Для расчета коэффициента поглощения α использовали известное соотношение:

$$I = I_0 \cdot \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha t)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha t)},$$

где R — коэффициент отражения, t — толщина ЭС. При определении α учитывали поглощение буферных слоев и подложки, а коэффициент отражения принимали равным $R_{InSb} = 0.35$ [6]. Полученные зависимости α от $h\nu$ для ЭС различного состава показаны на рис. 1, б. Ширину запрещенной зоны определяли обработкой кривых зависимостей α^2 от $h\nu$ по стандартной методике. Установленные при этом значения E_g практически совпадали с величинами, определенными при значении $\alpha = 300$ $см^{-1}$, принятым в [7].

Экспериментальные данные по зависимости E_g от состава ЭС представлены на рис. 2, где приведены также расчетные зависимости ширины запрещенной зоны от состава твердых растворов $InAs_{1-x}Sb_x$ и $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ [8]. Из рис. 2 видно, что для ЭС $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ наблюдается уменьшение E_g в среднем на 0.04 эВ по сравнению с расчетной для $InAs_{1-x}Sb_x$. При этом для однослойных гетероструктур достигнуты значения E_g до 0.165 эВ, а для двухслойных — до 0.145 эВ при 77 К.

Электрофизические характеристики ЭС $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ оценивали путем измерений эффекта Холла на установке Холл-100 с относительной погрешностью 15%. По результатам измерений ЭС имели р-тип проводимости с $\rho_{\text{тТК}} = 2 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$ $см^{-3}$ и $\mu_{\text{тТК}} = (1.2-5.5) \cdot 10^3$ $см^2/V \cdot с$. По результатам измерений

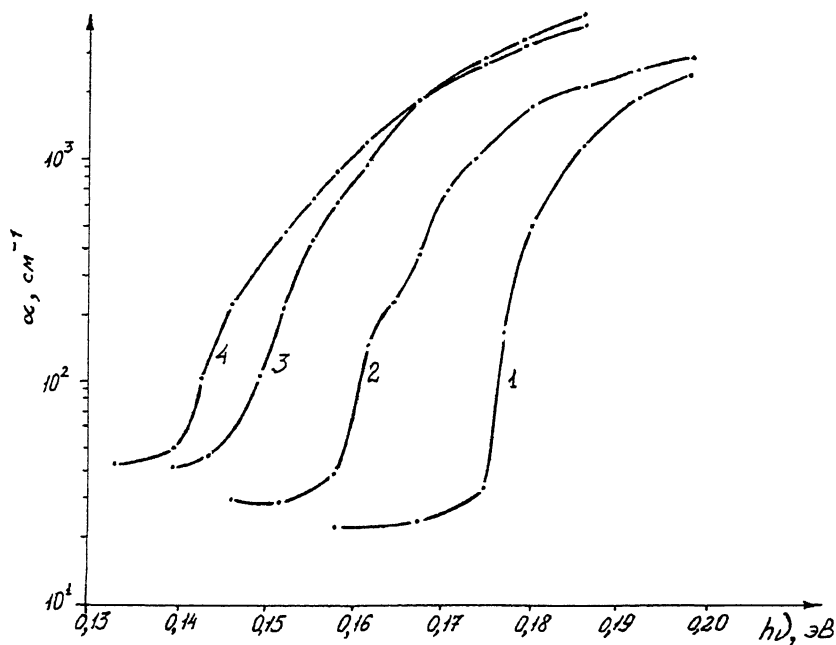
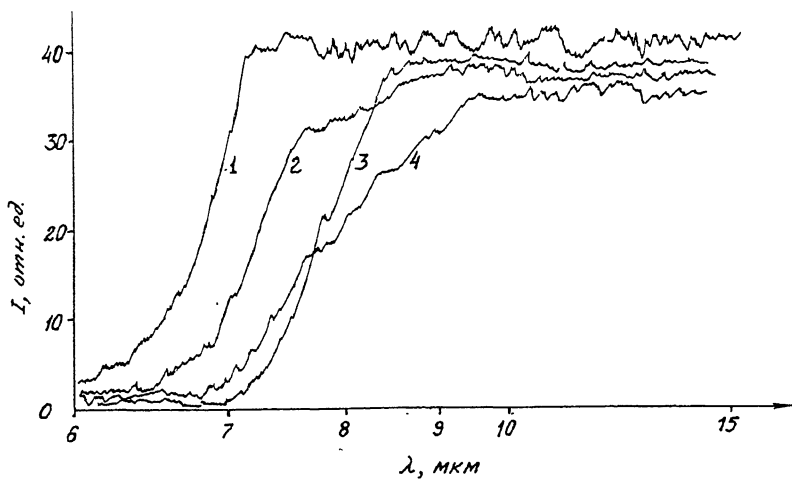


Рис. 1. Спектры оптического пропускания (а) и спектральная зависимость коэффициента поглощения (б) ЭС $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ при 77 К: 1 - $x=0.92$, 2 - $x=0.89$, 3 - $x=0.87$, 4 - $x=0.82$.

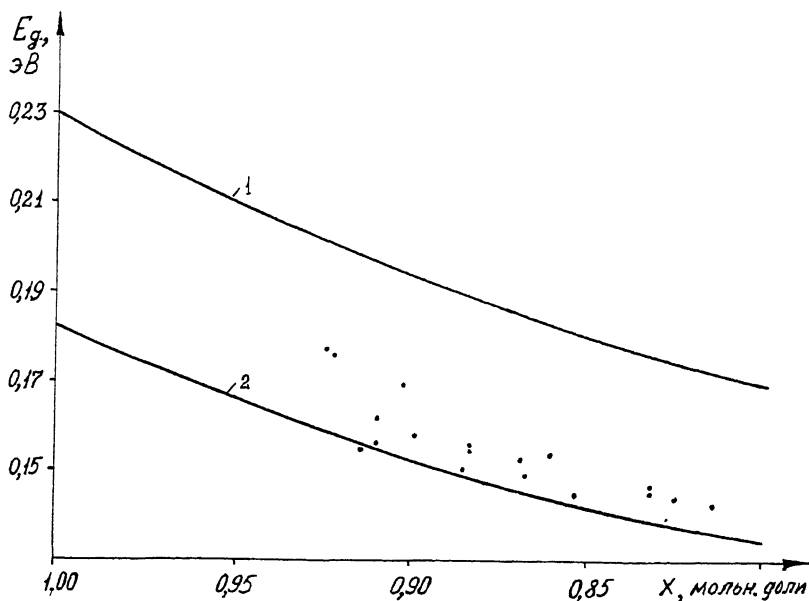


Рис. 2. Результаты расчета зависимости E_g от состава $InAs_{1-x}Sb_x$ (1) и $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ (2) при 77 К и экспериментальные данные.

вольт-фарадных характеристик, концентрация дырок в ЭС составила при 77 К $(2-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, впервые методом ЖФЭ получены ЭС твердых растворов $InAs_{1-x-y}Sb_xBi_y$ ($x=0.82-0.95$, $y=0.009$), для которых край собственного оптического поглощения достигает 8,5 мкм при 77 К.

Авторы выражают благодарность профессору В.И. Фистулю и доценту А.А. Гвелесиани за полезное обсуждение результатов работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Rogalski A. // Prog. Quant. Electr. 1989. V. 13. P. 191-231.
- [2] Kurtz S.R., Biefield R.M., Dawson L.R., Fritz I.J., Zipperian T.E. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 20. P. 1961-1963.
- [3] Kurtz S.R., Dawson L.R., Zipperian T.E., Whaley R.D. // IEEE Electron Device Lett. 1990. V. 11. N 1. P. 54-56.

- [4] Jean-Luis A.M., Hamon C. // Phys. Stat. Sol. (b). 1969. V. 34. N 1. P. 329-341.
- [5] Уфимцев В.Б., Зиновьев В.Г., Раухман М.Р. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы. 1979. Т. 15. № 10. С. 1740-1743.
- [6] Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения А^{III}В^V) / Под ред Уиллардсона Р. и Бира А. М.: Мир, 1970. 488 с.
- [7] Stringfellow G.B., Greene P.E. // J. Electrochem. Soc. 1971. V. 118. N 5. P. 805-810
- [8] Акчурин Р.Х., Сахарова Т.В., Тарасов А.В., Уфимцев В.Б. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы. 1992. Т. 28. № 3.

Московский
институт тонкой
химической технологии
им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
22 апреля 1992 г.