

05:06:07;11:12

Свойства твердых растворов GaInAsSb в области спинодального распада, полученных из сурьмянистых растворов-расплавов методом жидкофазной эпитаксии

© В.И. Васильев, А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, В.М. Смирнов,
Г.С. Соколовский, Д.Н. Третьяков, Н.Н. Фалеев

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

Поступило в Редакцию 22 октября 1997 г.

Сообщается о получении методом жидкофазной эпитаксии из жидких фаз, обогащенных Sb, эпитаксиальных слоев твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ на изопериодическом с GaSb сечении внутри области спинодального распада. Наибольшее значение состава ($x = 0.4$) достигнуто при выращивании на подложке GaSb(111)В. Приводятся результаты исследований люминесцентных и структурных свойств полученных твердых растворов.

Существование обширной области несмешиваемости в четверной системе твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ было предсказано в ряде теоретических работ, например [1,2]. С практической точки зрения интерес представляют твердые растворы, которые находятся на изопериодическом с GaSb сечении. Теоретические модели, описывающие зону несмешиваемости и область спинодального распада внутри ее, показали невозможность получения твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$, изопериодических с GaSb для $x \geq 0.29$ при реальных условиях проведения процессов жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). В экспериментальных работах по жидкофазному выращиванию этих твердых растворов на подложках GaSb также сообщалось о серьезных проблемах, возникающих при получении составов с $x > 0.18$ [3,4]. Максимальные значения составов эпитаксиальных слоев, изопериодических с GaSb, были получены в работах [2,4] и достигали значений $x = 0.23$; $y = 0.2$ при выращивании на GaSb (100) и $x = 0.26$; $y = 0.23$ на GaSb (111)В.

В настоящей работе сообщается о получении методом ЖФЭ из сурьмянистых растворов-расплавов, изопериодических с GaSb, твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ в области спиноподобного распада (при этом были достигнуты значения состава $x = 0.4$) и исследовании люминесцентных и структурных свойств эпитаксиальных слоев.

Нелегированные слои твердых растворов GaInAsSb выращивались методом ЖФЭ из растворов-расплавов, обогащенных Sb, на нелегированных подложках GaSb *p*-типа с ориентацией (100) и (111)В. Использование сурьмянистых жидких фаз для получения рассматриваемых твердых растворов было впервые предложено нами и описано в более ранних работах [5–7]. Состав полученных слоев определялся с помощью рентгеновского микроанализатора Camebax, а в случаях, когда толщина слоев была менее $1 \mu\text{m}$, использовались данные вторичной ионной масс-спектрографии (ВИМС). Величина несоответствия параметров решеток (НПР) эпитаксиального слоя и подложки (f_{\perp}) измерялась методами двухкристальной рентгеновской дифрактометрии. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались с помощью монохроматора МДР-23. Для возбуждения использовался газовый лазер ЛГ-106-М1, в качестве приемника применялось охлаждаемое фотосопротивление PbS. Толщины эпитаксиальных слоев измерялись на профилометре ДЕСТАК.

Экспериментальные образцы были выращены из переохлажденных жидких фаз при постоянной температуре. Величина переохлаждения $\Delta T = T_L - T_g$ (где T_L и T_g — соответственно температура ликвидуса жидкой фазы и температура выращивания) варьировалась в пределах $8 \div 12^\circ\text{C}$. Значения T_g выбирались в области температур $575 \div 600^\circ\text{C}$. Диапазоны составов выращенных эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, близких по параметру решетки к GaSb, находились в пределах $0.2 \leq x \leq 0.32$ для ориентации (100) и $0.25 \leq x \leq 0.4$ для ориентации (111)В. Полученные слои имели зеркально-гладкую поверхность. Скорость осаждения изменялась от 3 до $0.05 \mu\text{m}/\text{min}$ с увеличением величины "х".

На рис. 1 приведены спектры ФЛ некоторых образцов при 77 К. Нами наблюдались спектры ФЛ, имеющие полосы как с полушириной $20 \div 25 \text{ meV}$ (рис. 1, *a, c*), характерные для ФЛ однородных по составу твердых растворов GaInAsSb, так и широкие ($\Delta h\nu = 40 \div 50 \text{ meV}$) (рис. 1, *b*), с явно выраженной асимметрией. В первом случае данные рентгеновской дифрактометрии показали, что значения НПР по абсолютной величине были близки к нулю (учет разницы коэффициентов

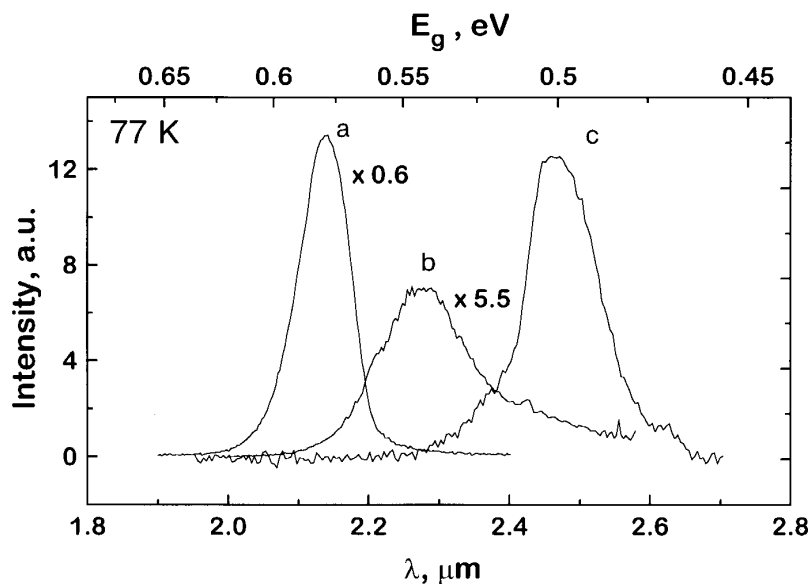


Рис. 1. Спектры ФЛ ($T = 77$ К) эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$. *a* — $x = 0.25$; $y = 0.21$; $\lambda_{\text{max}} = 2.14 \mu\text{m}$; $T_g = 600^\circ\text{C}$; ориентация подложки (100); $f_{\perp} = -7 \cdot 10^{-4}$; толщина эпитаксиального слоя $d = 2 \mu\text{m}$. *b* — $x = 0.32$; $y = 0.27$; $\lambda_{\text{max}} = 2.29 \mu\text{m}$; $T_g = 582^\circ\text{C}$; (111)В; $f_{\perp} = 3.2 \cdot 10^{-3}$; $d = 4470 \text{ \AA}$. *c* — $x = 0.4$; $y = 0.36$; $\lambda_{\text{max}} = 2.46 \mu\text{m}$; $T_g = 576^\circ\text{C}$; (111)В; $f_{\perp} \sim 0$; $d = 890 \text{ \AA}$.

термического расширения материалов слоя и подложки свидетельствует при этом об отрицательном НПР при температуре эпитаксиального выращивания). Значения полуширин кривых дифракционного отражения (КДО) от слоя и подложки были близки и находились в пределах $11 \div 20''$. Образцы, у которых спектры ФЛ были подобны приведенному на рис. 1, *b*, имели положительное НПР $f_{\perp} = (1 \div 3) \cdot 10^{-3}$. По этим данным можно предварительно предположить, что для получения однородных слоев в области спинодального распада более благоприятной является ситуация, когда растущий эпитаксиальный слой растянут вдоль гетерограницы. В тех случаях, когда растущий слой сжат вдоль гетерограницы, спектры рентгеновской дифрактометрии отличаются от обычно наблюдаемых наличием дополнительных пиков (рис. 2), появление

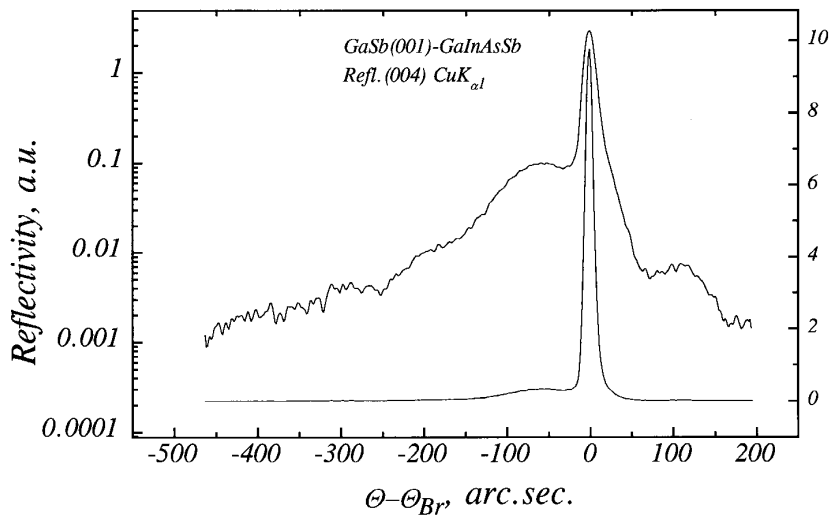


Рис. 2. КДО для гетероструктуры $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}_{0.26}\text{Sb}_{0.74}/\text{GaSb}$ (100).

которых можно связывать с процессами спиnodального распада. Отличительной особенностью жидкофазного выращивания твердых растворов GaInAsSb, составы которых находятся внутри области спиnodального распада, является резкое уменьшение (почти на 2 порядка) скорости роста эпитаксиальных слоев.

Ранее нами было показано [5–7], что при кристаллизации эпитаксиальных слоев GaInAsSb из растворов-расплавов, обогащенных Sb, за счет уменьшения влияния процессов, связанных с неравновесностью на межфазной границе GaSb (твердое)–[Ga–In–As–Sb] (жидкое) и различием в параметрах решеток, резко повышается устойчивость подложки по отношению к жидкой фазе. В условиях когерентного роста это позволило получить слои GaInAsSb, не уступающие по кристаллическому совершенству эпитаксиальным слоям GaSb на подложках GaSb. Мы предполагаем, что эти особенности кристаллизации из растворов-расплавов, обогащенных Sb, для составов жидких фаз, еще более далеких от равновесия с GaSb, в сочетании со стремлением минимизации энергии за счет когерентного роста (при этом НПП полностью компенсируется

упругой деформацией) приводят к тому, что в области составов твердых фаз, где по расчетам происходит спинодальный распад, кристаллизуются однородные слои, что подтверждается данными рентгеновской дифрактометрии, ВИМС и ФЛ.

Полученные результаты позволяют приступить к исследованию причин образования эпитаксиальных слоев GaInAsSb, составы которых находятся внутри области спинодального распада, когда условия кристаллизации представляются не сильно отличающимися от равновесных.

Авторы выражают благодарность В.М. Андрееву за поддержку работы, а также С.Ю. Беловой и Б.Я. Беру за проведение измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 96-02-17864а.

Список литературы

- [1] *Stringfellow G.B.* // J. Cryst. Growth. 1982. V. 58. P. 194–202.
- [2] *Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Литвак А.М., Попов А.А., Чарыков Н.А., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 5. С. 33–39.
- [3] *Dewinter J.C., Pollack M.A., Srivastava A.K., Zysking J.L.* // J. Electron. Mater. 1985. V. 14. N 6. P. 729–747.
- [4] *Tournie E., Lazzari J.-L., Pitard F., Alibert C., Joullie A., Lambert B.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 68(11). P. 5936–5938.
- [5] *Васильев В.И., Кузнецов В.В., Мишурный В.А.* // Тез. докл. IV Всесоюзн. конф. по термодинамике и материаловедению полупроводников. М., 1989. Ч. 1. С. 162.
- [6] *Васильев В.И., Кузнецов В.В., Мишурный В.А.* // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1990. Т. 26. № 1. С. 23–27.
- [7] *Vasil'ev V.I., Kuznetsov V.V., Mishurnyi V.A., Sazonov V.V., Faleev N.N.* // 1st Intern. Conf. on Epitax. Growth. Budapest, 1990. P. 659–663.