

# Гетероструктуры GaInAsSb/GaSb, выращенные в области спинодального распада методом жидкофазной эпитаксии из растворов–расплавов, обогащенных Sb

© В.И. Васильев, Д. Ахмедов, А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский<sup>¶</sup>, И.П. Никитина, В.М. Смирнов, Д.Н. Третьяков

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

Близкие к изопериодическим одиночные гетероструктуры  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb$ , в которых составы твердых растворов должны находиться внутри области спинодального распада ( $x \leq 0.4$ ), были выращены методом жидкофазной эпитаксии из растворов–расплавов, обогащенных Sb.

На основе результатов исследования структурных и люминесцентных свойств гетероструктур  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb$  были определены основные условия, обеспечивающие воспроизводимый рост эпитаксиальных слоев однородных по составу твердых растворов в области, где теоретически было предсказано существование процессов спинодального и бинадального распада. Показано, что величина и знак деформации, испытываемой слоем в процессе роста, а также толщина слоя являются основными факторами, которые влияют на свойства растущих твердых растворов GaInAsSb в зоне спинодального распада.

## Введение

Четвертые твердые растворы  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ , изопериодические с GaSb, являются перспективными материалами для оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона. Однако возможности создания приборов на основе этих соединений должны быть ограничены из-за существования в этой системе теоретически рассчитанной обширной зоны несмешиваемости и области спинодального распада внутри нее. В связи с этим предполагалось невозможным получить твердые растворы  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ , изопериодические с GaSb, для  $x > 0.29$  [1,2]. И действительно, наибольшие значения  $x$  и  $y$  на изопериодическом сечении со стороны GaSb, которые ранее удалось получить методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), достигли  $x = 0.23$ ,  $y = 0.20$  при выращивании на подложках GaAs(100) и  $x = 0.26$ ,  $y = 0.23$  на подложках GaSb(111)В [2,3], приходилась на область бинадального распада, а в значительно более неравновесных условиях газофазной эпитаксии находились вблизи границы спинодального распада ( $x = 0.3$ ). В настоящей работе сообщается о получении методом ЖФЭ из сурьмянистых растворов–распадов твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  ( $x \leq 0.4$ ), близких к изопериодическим с GaSb, в области спинодального распада.

## Эксперимент

Нелигированные эпитаксиальные слои четвертых твердых растворов были выращены из переохлажденных сурьмянистых растворов–расплавов при постоянной температуре. Эта методика получения рассматриваемых твердых растворов была впервые предложена нами и описана в наших публикациях [3–5]. В настоящей работе

слои выращивались при температурах от 560 до 600°C. Величина переохлаждения  $\Delta T = T_i - T_g$  (где  $T_i$  — температура роста) варьировалась в пределах от 8 до 120°C.

Состав твердых растворов в слоях толщиной более 1 мкм определялся с помощью рентгеновского микроанализатора Camebax или методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) в слоях, толщина которых была меньше 1 мкм. Величина несоответствия параметров решеток (НПР) эпитаксиального слоя и подложки ( $f_{\perp}$ ) измерялась методом двухкристальной рентгеновской дифрактометрии. Двухкристальные кривые качания (КК) были получены на симметричных отражениях (400) и (333) в зависимости от ориентации подложки. Для регистрации спектров фотолюминесценции (ФЛ) использовалось охлаждаемое фотосопротивление PbS. Толщины эпитаксиальных слоев измерялись на профилометре DECTAK

## Результаты и обсуждение

Исследования показали, что выбранные условия эпитаксиального роста могут обеспечить получение однородных, имеющих зеркально-гладкую поверхность, слоев с максимальными значениями  $x$ , как и ожидалось, зависящими от ориентации подложек. Для GaSb(100) и (111)В эти значения составляли 0.32 и 0.4 соответственно. Было также обнаружено, что для слоев у которых значения  $x$  соответствуют составам, значительно смещенным в глубь области, где должен был наблюдаться спинодальный распад, необходимо учитывать сильное влияние на процесс кристаллизации слоев еще двух факторов, определяющих степень их однородности. Это следовало из того, что по результатам измерений КК и спектрам ФЛ эти слои могут быть четко разделены по степени однородности на две группы. На КК, полученных

<sup>¶</sup> E-mail: viv.kuch@pop.ioffe.rssi.ru

от слоев первой группы, наблюдался только один пик, соответствующий твердому раствору GaInAsSb (рис. 1). Знак решеточного несоответствия для таких слоев был отрицательный, что аналогично их растяжению в плоскости роста. Величины НПР в таких слоях составляли от  $-5 \cdot 10^{-4}$  до  $-2 \cdot 10^{-3}$ , из чего следует, что при температуре роста значения НПР были сдвинуты еще на  $1 \cdot 10^{-3}$ . В спектрах ФЛ этих образцов также присутствовал один пик с полушириной 20–25 мэВ, обусловленный межзонной рекомбинацией (рис. 2). Толщины гомогенных слоев твердых растворов, состав которых соответствовал зоне спинодального распада, не превышали 500 Å. Следует отметить, что вне зависимости от степени однородности слоев скорость их роста по мере сдвига состава внутрь области спинодального распада быстро уменьшалась от 3 мкм/мин при  $x = 0.2$  до 500 Å/мин при  $x = 0.4$ . На КК, полученных от слоев второй группы, наблюдались два пика от твердых растворов с отрицательным и положительным НПР (рис. 3), другими словами, в этих слоях, состав которых также соответствовал зоне спинодального распада, происходил распад твердого раствора. Процесс распада твердого раствора сопровождался уширением полосы межзонной рекомбинации на спектрах ФЛ до 50 мэВ. Толщины таких слоев обычно были больше 500 Å. Надо подчеркнуть, что распад твердого раствора не наблюдался в слоях, состав которых лежал вне зоны спинодального распада, независимо от их толщины.

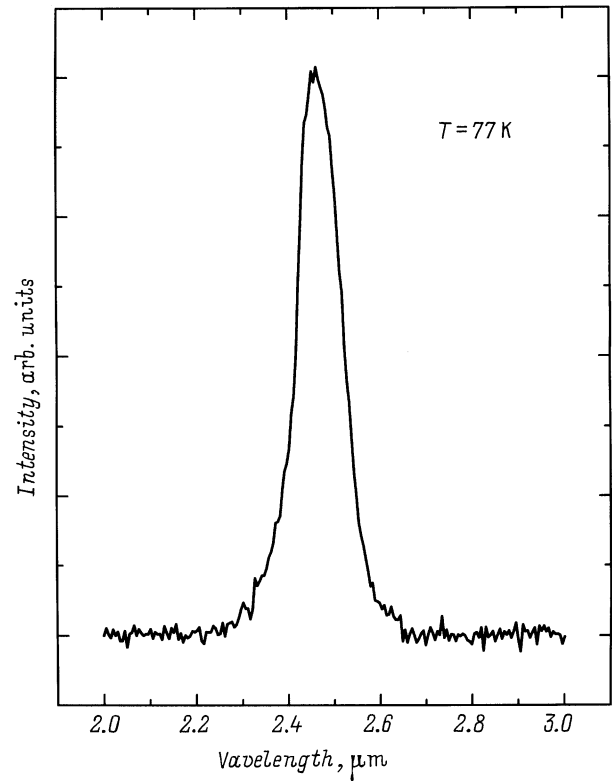


Рис. 2. Спектр фотолуминесценции гетероструктуры  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}_{0.38}\text{Sb}_{0.62}/\text{GaSb}$ .

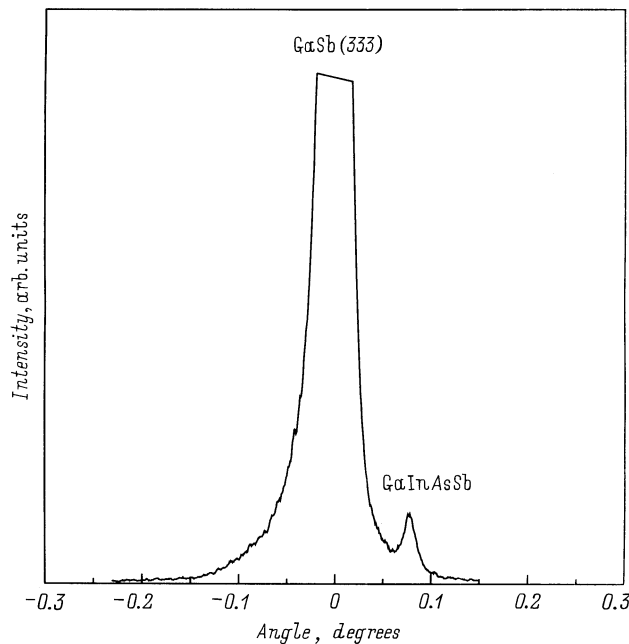


Рис. 1. Рентгенодифракционные кривые качания (излучение  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ) вблизи отражения GaSb(333) для однородного эпитаксиального слоя  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.41}\text{As}_{0.38}\text{Sb}_{0.62}$ , выращенного на подложке GaSb(111) ( $f_{\perp} = 1.46 \cdot 10^{-3}$ ).

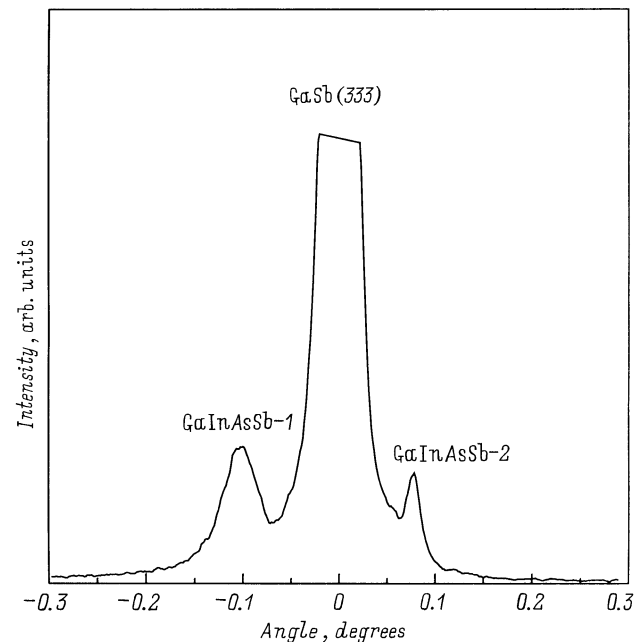
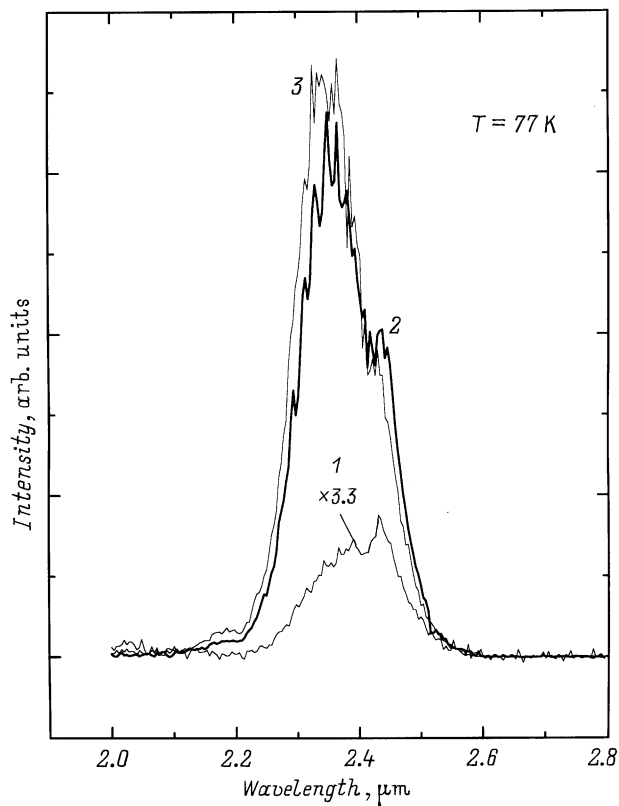


Рис. 3. Рентгенодифракционные кривые качания (излучение  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ) вблизи отражения GaSb(333) для эпитаксиального слоя  $\text{Ga}_{0.63}\text{In}_{0.37}\text{As}_{0.36}\text{Sb}_{0.64}$ , выращенного на подложке GaSb(111) с признаками спинодального распада (1 —  $f_{\perp} = +1.94 \cdot 10^{-3}$ , 2 —  $f_{\perp} = -1.55 \cdot 10^{-3}$ ).



**Рис. 4.** Спектры фотолуминесценции эпитаксиальных слоев твердых растворов  $\text{Ga}_{0.63}\text{In}_{0.37}\text{As}_{0.36}\text{Sb}_{0.64}/\text{GaSb}$  разной толщины, Å: 1 — 1000, 2 — 360, 3 — 200.

Более детальные исследования влияния толщины на структурные и оптические свойства слоев при заданных составах жидкой фазы, температуре роста и величине переохлаждения показали, что при превышении ее значений  $\sim 200$  Å в рентгеновских КК появляется дополнительный пик от твердого раствора с положительным НПР, причем его интенсивность возрастает с увеличением толщины. Одновременно наблюдается уменьшение интенсивности и увеличение полуширины полосы межзонной рекомбинации в спектрах ФЛ (рис. 4). Это свидетельствует о том, что по мере роста (т.е. удаления от гетерограницы) слоев  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  в области составов, где должен происходить спиноподобный распад, ослабляется положительное влияние растягивающей деформации вдоль гетерограницы. Таким образом, результаты, полученные в этой и предыдущих наших работах [3,6], позволяют сделать вывод, что при эпитаксиальном выращивании твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  из растворов-расплавов, обогащенных сурьмой, задавая значения рассогласования на гетерограницах, толщины слоя и его состава, возможно одновременное управление свойствами гетероструктур за счет изменения степени неоднородности в направлении, не только перпендикулярном гетерогранице, но и параллельном ей.

## Заключение

В настоящей работе показана возможность изменения степени неоднородности эпитаксиальных слоев за счет выбора значения НПР и времени роста. Установлено, что растягивающая деформация в слое параллельно гетерогранице и малая толщина (0.02–0.05 мкм) являются необходимыми условиями для получения однородных твердых растворов в зоне спиноподобного распада.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (номер проекта 96-02-17864а).

## Список литературы

- [1] А.М. Литвак, Н.А. Чарыков. ЖФХ, **66**, 923 (1992).
- [2] E. Tournie, J.-L. Lazzari, F. Pitard, C. Alibert, A. Joulie, B. Lambert. J. Appl. Phys., **68**, 5936 (1990).
- [3] A.G. Deryagin, N.N. Faleev, V.M. Smirnov, G.S. Sokolovskii, V.I. Vasil'ev. IEE Proceeding, Optoelectronics. **144**, 438 (1997).
- [4] В.И. Васильев, В.В. Кузнецов, В.А. Мишурный. Изв. АН СССР, сер. Неорг. матер., **26**, 23 (1990).
- [5] V.I. Vasil'ev, V.V. Kuznetsov, V.A. Mishurnyi, V.V. Sazonov, N.N. Faleev. Proc. 1st Int. Conf. on Epitax. Growth (Budapest, 1990) p. 659.
- [6] В.И. Васильев, Ф.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, В.М. Смирнов, Г.С. Соколовский, Д.Н. Третьяков, Н.Н. Фалеев. Письма ЖТФ, **24**(6), 58 (1998).

Редактор В.В. Чалдышев

## GaInAsSb/GaSb heterostructures grown in the spinoidal decay range by liquid-phase epitaxy from Sb-rich solution-melts

V.I. Vasil'ev, D. Akhmedov, A.G. Deryagin, V.I. Kuchinskii, I.P. Nikitina, V.M. Smirnov, D.N. Tretyakov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St.Petersburg, Russia