

УДК 537.311: 538.971

СТРУКТУРНЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР $Al_xGa_{1-x}As/GaAs(100)$, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

© 2005 Э.П. Домашевская¹, П.В. Середин¹, А.Н. Лукин¹, Л.А. Битюцкая¹,
К.С. Борщев^{1,2}, М.В. Гречкина¹, И.Н. Арсентьев²

¹Воронежский государственный университет
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Поступила в редакцию 05.07.05

Совокупность структурных, спектральных и морфологических исследований, проведенных с использованием рентгеновской дифрактометрии, ИК-решеточной спектроскопии на отражение и атомно-силовой микроскопии, свидетельствует о структурной устойчивости твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ в области составов $x \sim 0.50$ эпитаксиальных гетероструктур, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес у исследователей вызывают явления, связанные с возникновением упорядоченных структур в эпитаксиальных слоях твердых растворов полупроводниковых соединений A^3B^5 , являющихся основными исходными материалами для компонентов микро и наноэлектронных устройств.

Так ряд работ в этой области [1-4] акцентирует внимание на проблемах анализа твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ в области $x \sim 0.50$ в виду их структурной неустойчивости, сопровождающейся образованием областей упорядочения в виде сверхструктурных фаз.

Актуальность проблемы упорядочения связана с модификацией фундаментальных свойств полупроводниковых систем, обусловленной понижением симметрии сфалеритной структуры соединений A^3B^5 , следствием которого является возможное изменение ширины запрещенной зоны, переход от непрямозонного к прямозонному полупроводнику, инверсному порядку следования зон, усложнению XANES и ИК-спектров сверхструктурных фаз в результате снятия вырождения с состояний, соответствующих потолку валентной зоны и дну зоны проводимости.

В нашей предыдущей работе [5] представлены результаты исследования эпитаксиальных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs(100)$, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Методами рентгеновской дифракции было установлено, что в эпитаксиальных твердых растворах с $x=0.50$ и $x=0.54$ появляется фаза упорядочения $AlGaAs_2$, являющаяся сверхструктурой к решетке сфалерита. Решетку обнаруженной фазы $AlGaAs_2$ можно описать слоистой структурой $InGaAs_2$ -типа (Layered Tetragonal) [6] с направлением упорядочения [100]. В этой структуре элементарная ячейка соответствует двум ячейкам типа сфалерита, поставленным друг на друга вдоль оси с, перпендикулярно к которой расположены чередующиеся слои Al – As и Ga – As. Величина тетрагонального сжатия $c/2a$ составляет в сверхструктуре величину, равную 0.97.

Целью данной работы явился анализ возможной структурной неустойчивости твердых растворов гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs(100)$, полученных методом жидкофазной эпитаксии, в области составов, близких к $x=0.50$. Однако следует отметить, что среди основных методов эпитаксии: молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), хими-

ческого осаждения из газовой фазы (к которому относится и МОС-гидридная эпитаксия) и жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), последняя является наиболее равновесным способом получения эпитаксиальных слоев. Поэтому образование сверхструктурных фаз упорядочения, во многом обусловленное процессами самоорганизации, в случае жидкофазной эпитаксии представляется наименее вероятным. Для сопоставления структурных, спектральных и морфологических характеристик эпитаксиальных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (100), полученных двумя разными методами: МОС-гидридной [5] и ЖФ эпитаксии, в данной работе нами были предприняты исследования жидкофазных эпитаксиальных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (100), методами рентгеновской дифрактометрии, ИК-спектроскопии на отражение и методами зондовой микроскопии с использованием атомно-силового микроскопа.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследовались гетероструктуры, изготовленные в ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН. На монокристаллических подложках GaAs (100) методом жидкофазной эпитаксии были выращены монокристаллические пленки $Al_xGa_{1-x}As$ различной толщины. Технологические данные относительно толщин слоев эпитаксиальных твердых растворов гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (100) и содержания в них Al по данным микроанализа приведены в таблице 1.

Все дифрактометрические исследования в данной работе проводились на дифрактометре ДРОН-3 с рентгеновским $Cu_{K\alpha_{1,2}}$ излучением.

ИК - решеточные спектры отражения от исследуемых эпитаксиальных гетероструктур получали при комнатной температуре в интервале от 200 до 600 cm^{-1} с помощью ИК-спектрометра Specord-82 M, сопряженного с ЭВМ и имеющего разрешение в $1cm^{-1}$.

Морфологию поверхности МОС - гидридных эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}As$ от гетероструктур исследовали на сканирующем зондовом микроскопе Femtoscan-001 в атомно-силовом режиме с кантилевером CSC 12 в режиме AFM.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Измерение параметров решетки дифрактометрическим методом

Для определения постоянной решетки твердых растворов a^v с учетом упругих напряжений в гетероэпитаксиальном слое методами рентгеновской дифракции измеряют ее перпендикулярную составляющую a^{\perp} [1]. Определение параметров эпитаксиальных пленок $Al_xGa_{1-x}As$ производилось по линии (400). Для вычисления постоянных решеток твердых растворов a^v коэффициенты Пуассона были взяты из литературных данных: $\nu_{AlAs} = 0.255$ [1,2], $\nu_{GaAs} = 0.312$ [7].

Разложение дифракционных линий на компоненты проводилось по методике, описанной в [5] с использованием программы регрессивного анализа Sigma Plot 9. Для раз-

Таблица 1

Характеристики исследуемых гетероструктур

N	Состав эпитаксиальной гетероструктуры	x	μ , мкм	$a^v_{эпит}$, Å	a^v , Å [8]
1	$Al_{0.17}Ga_{0.83}As/GaAs$ (100)	0.17	6	5.654	5.655
2	$Al_{0.37}Ga_{0.63}As/GaAs$ (100)	0.37	1.6	5.656	5.656
3	$Al_{0.49}Ga_{0.51}As/GaAs$ (100)	0.49	1.6	5.656	5.657
4	$Al_{0.57}Ga_{0.43}As/GaAs$ (100)	0.57	1.5	5.656	5.658
5	$Al_{0.71}Ga_{0.29}As/GaAs$ (100)	0.71	0.9	5.658	5.659
6	GaAs (100)			5.654	5.653

СТРУКТУРНЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР $Al_xGa_{1-x}As/GaAs(100)$, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

ложения использовался $(400) K_{\alpha_{1,2}}$ -дублет монокристаллической пластины $GaAs(100)$. Результаты разложения (400) линии на $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублеты показали (табл. 1) и (рис. 1, а – 1, е), что дифракционные профили (400) – линий всех образцов являются наложением дифракций от эпитаксиального слоя $Al_xGa_{1-x}As$ и от подложки $GaAs(100)$. По результатам раз-

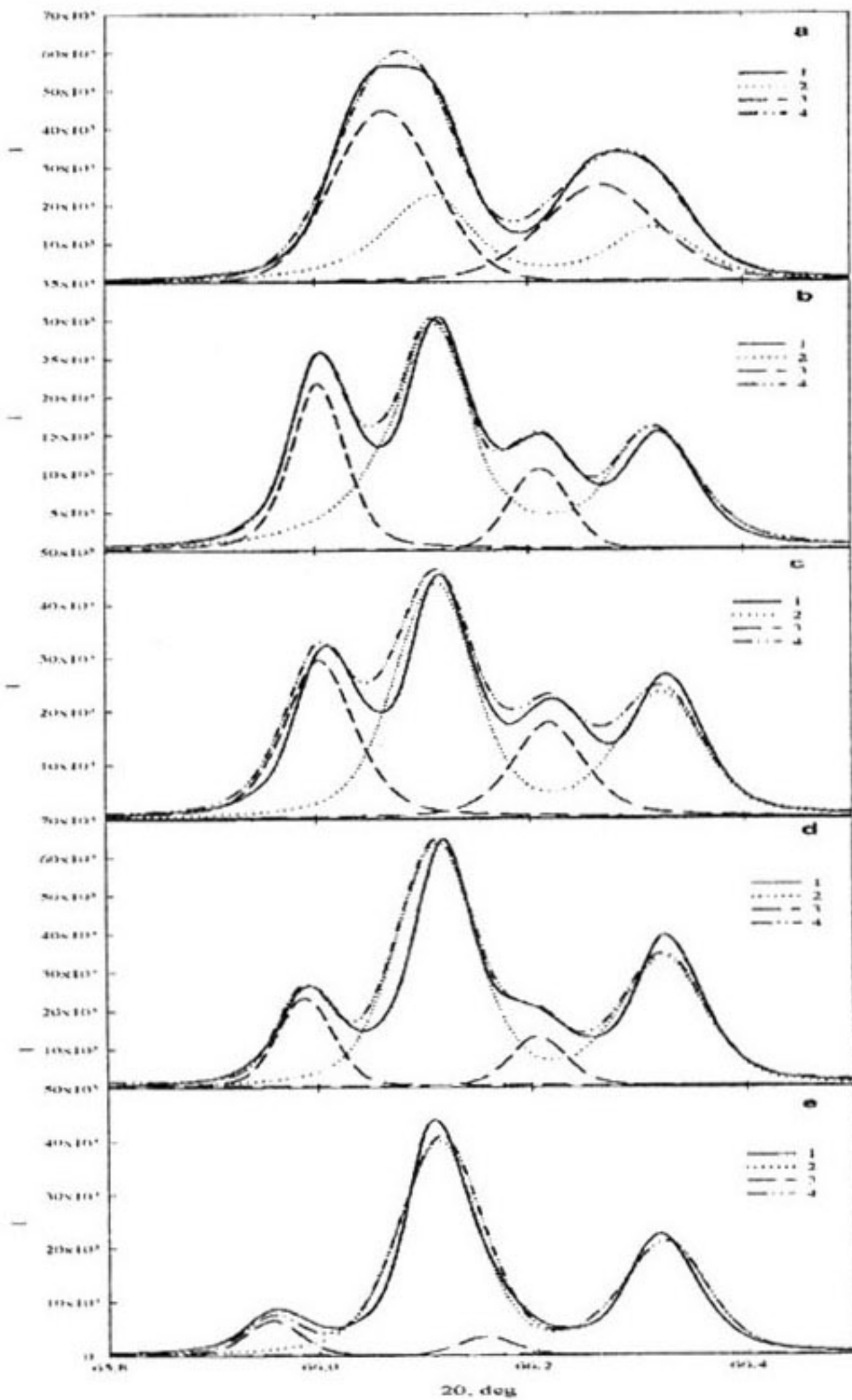


Рис. 1. Разложение профилей дифракционных линий (400) эпитаксиальных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs(100)$: 1 – экспериментальный профиль, 2 – $K_{\alpha_{1,2}}$ дифракционный дублет $GaAs(100)$; 3 – дифракция от твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, 4 – аппроксимация (а) гетероструктура $Al_{0.17}Ga_{0.83}As/GaAs(100)$, (б) гетероструктура $Al_{0.37}Ga_{0.53}As/GaAs(100)$, (с) гетероструктура $Al_{0.49}Ga_{0.51}As/GaAs(100)$, (д) гетероструктура $Al_{0.57}Ga_{0.43}As/GaAs(100)$, (е) гетероструктура $Al_{0.71}Ga_{0.29}As/GaAs(100)$.

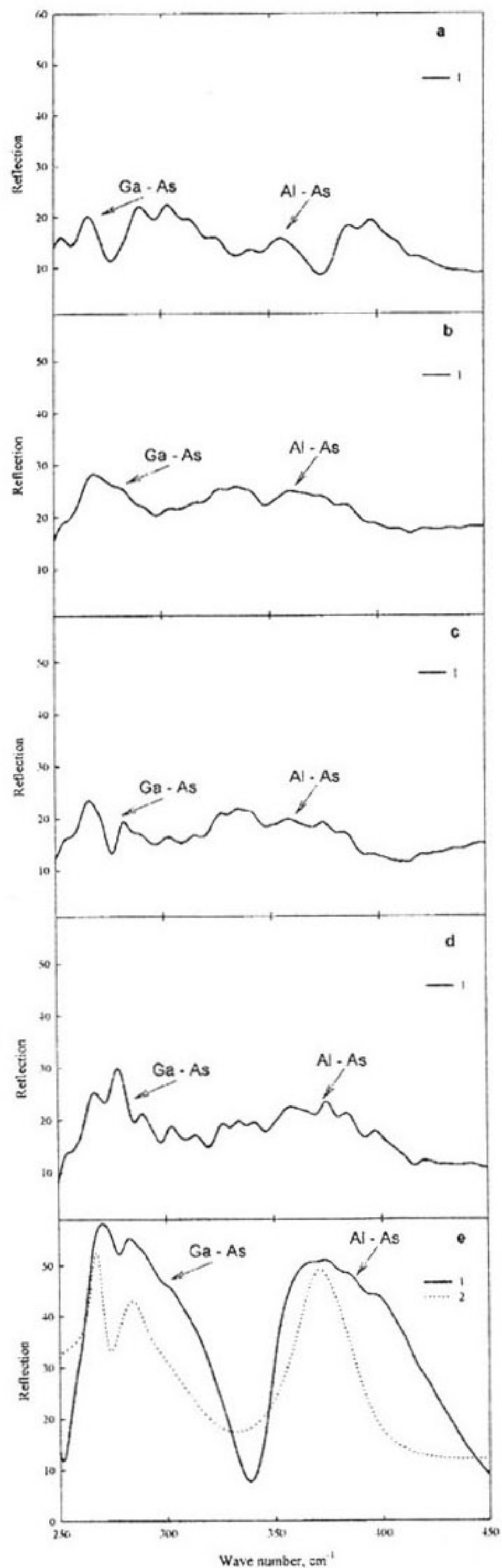


Рис. 2. ИК – спектры отражения $GaAs(100)$ и эпитаксиальных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs(100)$: 1 – эксперимент, 2 – расчет; (а) гетероструктура $Al_{0.17}Ga_{0.83}As/GaAs(100)$, (б) гетероструктура $Al_{0.37}Ga_{0.53}As/GaAs(100)$, (с) гетероструктура $Al_{0.49}Ga_{0.51}As/GaAs(100)$, (д) гетероструктура $Al_{0.57}Ga_{0.43}As/GaAs(100)$, (е) гетероструктура $Al_{0.71}Ga_{0.29}As/GaAs(100)$.

ложения на компоненты были определены параметры кристаллических решеток твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с точностью $\pm 0.001 \text{ \AA}$, которые приведены в таблице 1 вместе со значениями параметров, ожидаемых в соответствии с линейным законом Вегарда, приведенном на сайте ФТИ РАН [8].

2. ИК-спектры отражения колебаний решетки

На рисунках 2,а – 2,е приведены экспериментальные спектры эпитаксиальных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(100)$ с малым, большим и близким к половинному содержанием Al в металлической подрешетке. Как видно из рисунка 2, только ИК - спектр решеточного отражения образца с $x=0.71$ содержит две моды колебаний, отвечающие связям Al – As и Ga – As что соответствует литературным данным [9-10]. В спектрах остальных образцов помимо мод, относящихся к связям Al – As и Ga – As, присутствуют дополнительные моды различной интенсивности, расположенные как между основными колебаниями, так и смещенные

в длинно- и коротковолновую части спектра относительно основных колебаний.

Дисперсионный анализ спектра образца с $x=0.71$, проведенный по методике пленка – подложка [11], показал, что использование данной модели к этому спектру не дает хорошего совпадения с экспериментом из-за значительного уширения мод колебаний экспериментального спектра. Для остальных образцов проводить дисперсионный анализ не имело смысла в виду плохого качества спектров, которое может быть обусловлено дефектами поверхности слоев, выращенных методом ЖФЭ.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты морфологических исследований методом зондовой микроскопии: (а) - изображения характерных микроучастков двух образцов; (б) - сечения их поверхности; (с) - соответствующие функции распределения рельефа поверхности для эпитаксиальных гетероструктур с различным содержанием Al в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в том числе и с близким к половинному составу ($x=0.49$).

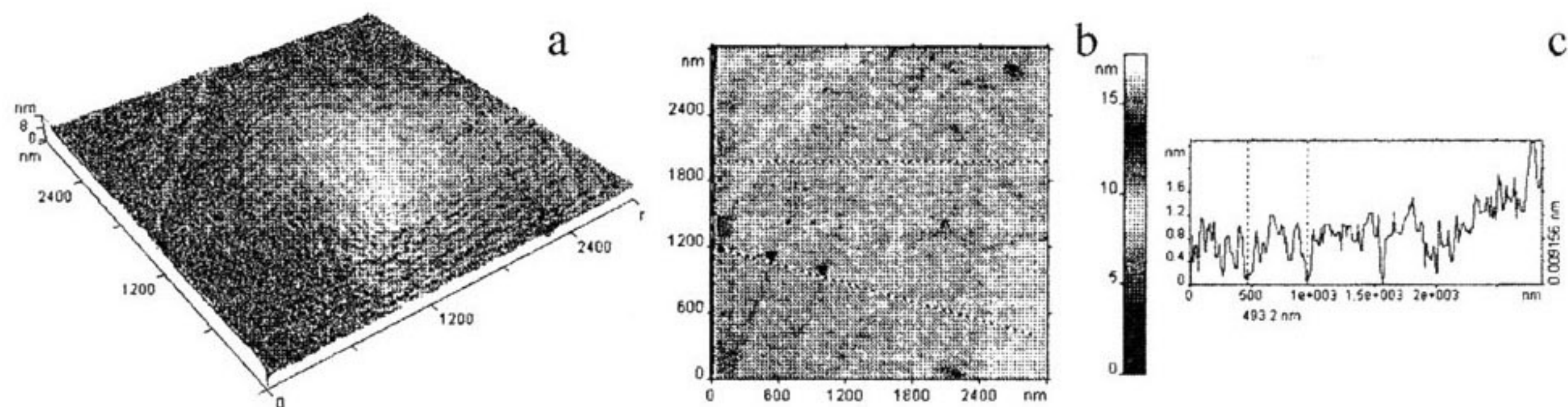


Рис. 3 Изображение участка поверхности (2.5x2.5 мкм) и функция распределения рельефа поверхности гетероструктуры $\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}/\text{GaAs}(100)$.

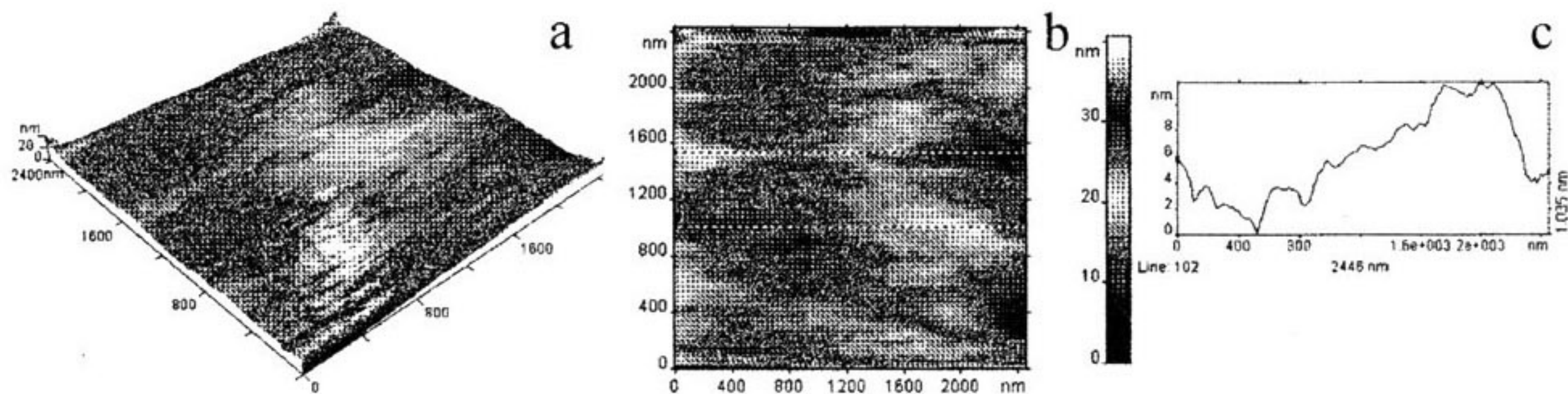


Рис. 4 Изображение участка поверхности (2.5x2.5 мкм) и функция распределения рельефа поверхности гетероструктуры $\text{Al}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{As}/\text{GaAs}(100)$.

Из рисунков видно, что образцы имеют шероховатую поверхность, с углублениями, достигающими 10 нм. Такое несовершенство морфологии поверхности приводит к плохому качеству ИК-спектров отражения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значения параметров решетки a^* жидкофазных эпитаксиальных твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ различных составов, определенные с учетом упругих напряжений, удовлетворяют линейному характеру зависимости параметра решетки от состава твердого раствора в системе $AlAs-GaAs$, приведенному в [5 и 8].

Данные ИК спектроскопии отражения показали, что в спектрах жидкофазных эпитаксиальных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (100) с различными концентрациями Al в металлической подрешетке, несмотря на плохое отражение поверхностью, все же присутствуют основные моды колебаний Ga – As и Al – As. Появление дополнительных мод и уширение линий спектра связано с тем, что на поверхности образцов присутствует большое количество микроскопических дефектов и неровностей, что подтверждают данные атомно-силовой микроскопии.

Сверхструктурная фаза $AlGaAs_2$, обнаруженная в ходе аналогичных исследований МОС-гидридных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (100) с $x \sim 0.50$, не наблюдалась ни одним из методов в образцах близкого состава, полученных жидкофазной эпитаксией.

Таким образом, совокупность структурных, спектральных и морфологических исследований свидетельствует о структурной устойчивости твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ в области составов $x \sim 0.50$ эпитаксиальных гетероструктур, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Zhou and B.F. Usher. Deviation of the AlGaAs lattice constant from Vegard's law // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 1461-1465.
2. Z.R Wasilewski, M.M Dion, D.J Lockwood, P Poole, R.W. Streater and A J. Spring Thorpe. Composition of AlGaAs // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 1683-1694.
3. S. Gehrsitz, H. Sigg, N. Herres, K. Bachem, K. Kohler and F.K. Reinhart. Compositional dependence of the elastic constants and the lattice parameter of $Al_xGa_{1-x}As$ // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. № 11. P. 601-611.
4. T.S. Kuan, T.F. Kuech, W.I. Wang. Long-Range Order in $Al_xGa_{1-x}As$ // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 201.
5. Э.П. Домашевская, П.В. Середин, Э.А. Долгополова, И.Е. Занин И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов. Закон Вегарда и сверхструктурная фаза в эпитаксиальных гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (100) // ФТП. 2005. Т. 3. С. 354-360.
6. Alex Zunger. MRS-IRS bulletin/ July 1997. <http://www.sst.nrel.gov/images/mrs97>
7. Adachi S. GaSb, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$: Material parameters for use in research and device applications// J. Appl. Phys. 1985. V. 58. R1-29
8. Сайт РФТИ им. Иоффе С-Пб. Характеристики новых полупроводниковых материалов. www.ioffe.ru
9. M. Ilegems, G.L. Pearson. Infrared reflection spectra of $Ga_{1-x}Al_xAs$ mixed crystals // Phys. Rev. B. 1970. V. 1. № 4. P. 1576-1582.
10. I. F. Chang, S.S. Mitra. Optical phonons in $Ga_{1-x}Al_xAs$ mixed crystals. // Phys. Rev. B. 1970. V. 2. № 4. P. 1215-1216.
11. H.W. Verleur. Determination of Optical Constant from Reflection or Transmittance Measurements on Bulk // JOSA. 1968. V. 58. P. 1356.