

СТРУКТУРНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ВСЛЕДСТВИЕ СПИНОДАЛЬНОГО РАСПАДА

© 2011 П. В. Середин¹, А. В. Глотов¹, В. Е. Терновая¹, Э. П. Домашевская¹, И. Н. Арсентьев²

¹Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Россия

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Политехническая 26, 194021 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 17.03.2011 г.

Аннотация. Методами рентгеноструктурного анализа и фотолюминесцентной спектроскопии показана возможность возникновения неоднородностей в жидкофазных эпитаксиальных гетероструктурах, возникающих в результате спинодального распада «погруженного» четверного твердого раствора $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ по причине несмешиваемости его компонентов и релаксации параметра его кристаллической решетки к окружающим слоям.

Ключевые слова: твердые растворы, спинодальный распад, $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование периодических упорядоченных структур на поверхности полупроводника предполагает возможность изготовления гетероструктур, в которых узкозонный материал помещен в матрицу материала, имеющего большую ширину запрещенной зоны. Это обеспечивает ограничение потенциальной энергии электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Периодические структуры таких включений образуют естественные нано-гетероструктуры, которые создают основу для новой технологии получения опто- и нанoeлектроники нового поколения [1].

Так, в ряде работ, посвященных исследованию структурных и оптических свойств эпитаксиальных пленок твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, показана возможность возникновения в них периодической доменной структуры [2—5]. Структурные свойства таких твердых растворов, получаемых на подложках GaAs(100), мало изучены.

Таким образом, исследование процессов эпитаксиального осаждения и свойств полупроводниковых твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ представляет интерес как со стороны подбора технологических условий, позволяющих получать однородные твердые растворы, так и с позиций изучения явления несмешиваемости, наблюдаемого в этой системе твердых растворов и требующего дополнительного изучения, поскольку в литературе остается ряд противоречий и открытых вопросов. Также заслуживает внимания идея о практическом ис-

пользовании распада твердых растворов с целью получения нано- и микрообъектов. Поэтому целью нашей работы является изучение структурной неустойчивости четверных твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, возникающей при спинодальном распаде.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе исследовались образцы, полученные методом жидкофазной эпитаксии в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН (см. табл. 1). В первых двух образцах четверной раствор располагался на поверхности двухслойной гетероструктуры. Эти образцы Н157 и Н162 состоят из двух эпитаксиальных слоев: тройного твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}P$, покрытого слоем четверного твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$. В этих образцах рост эпитаксиальных слоев $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ начинался при температуре $T_G=750$ °С, при переохлаждении расплава $\Delta T=1$ °С, происходил при скорости охлаждения $V_{охл}=0.08$ °С/мин и времени роста $t_p=5$ с.

В двух других образцах слой четверного твердого раствора был «погружен» между двумя слоями тройного твердого раствора. Эти образцы Н200 и Н203 представляют собой трехслойную эпитаксиальную структуру, состоящую из слоя $Ga_xIn_{1-x}P$, слоя четверного твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ и покрывающего слоя $Ga_xIn_{1-x}P$. Рост твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ начинался при температуре $T_G=750$ °С, ($\Delta T=2$ °С) и происходил при скорости $V_{охл}=0.08$ °С/мин в течение $t_p=40$ с.

Таблица 1. Состав гетероструктур и навески, используемые для роста слоя $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$

№ образца	Состав гетероструктур	Составы жидких фаз для роста $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, мг			
		In	InP	Ga	InAs
H157	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs$ (100)	5000	91	95.5	1001
H162	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs$ (100)	5000	82.3	106.5	1099
H200	$Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.50}In_{0.50}P/GaAs$ (100)	5000	100	83	883
H203	$Ga_{0.49}In_{0.51}P/Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.49}In_{0.51}P/GaAs$ (100)	5000	116	62.57	636.8

Определение параметров кристаллической решетки эпитаксиальных слоев, а также их согласование определяли методом рентгеновской дифракции с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4-07 с $Cu_{K\alpha 1,2}$ -излучением.

Спектры фотолюминесценции были получены при комнатной температуре с использованием спектрально-аналитического комплекса на базе МДР-4.

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОФАЗНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Для наших исследований была выбрана линия (600), находящаяся в интервале от 109.00° до 110.40° . Несмотря на ее небольшую интенсивность, на больших углах отражения за счет большей дисперсии происходит значительное разделение дублетов дифрагированного $Cu_{K\alpha 1,2}$ излучения, а вклад от подложки в распределение интенсивности линии (600) значительно уменьшается. Профили рентгеновской (600) дифракции от образцов гетероструктур H157, H162, H200 и H203 приведены на рис. 1а–д.

Как видно из экспериментальных данных, дифракционный профиль от гетероструктуры образца H157, приведенный на рис. 1а имеет два дифракционных максимума. Разложение профилей на составляющие проводили с помощью программного комплекса «New profile 34» и пакета SigmaPlot 11, позволившего, используя различные аналитические функции, минимизировать погрешности разложения профилей и автоматизировать процесс подбора моделирующего профиля.

Процесс разложения экспериментальных линий (600) на компоненты начинался с выделения на дифрактограмме $K_{1,2}^\alpha$ — дублета подложки GaAs(100) из общего профиля экспериментальной линии гетероструктуры. В качестве подложки использовался образец GaAs(100) марки АГН. Величина постоянной решетки GaAs(100), измеренная

нами, составила $5.6532 \pm 0.0001 \text{ \AA}$. Далее выделяли дифракцию от пленки, вычитая дублет рентгеновской дифракционной линии (400) от подложки GaAs (100), учитывая незначительное ослабление брэгговского отражения от подложки тонкой эпитаксиальной пленкой.

Результаты разложения (600) дифракции на компоненты для гетероструктуры H157 показывают, что общий профиль дифракции является наложением трех $K\alpha_{1,2}$ -дублетов: от подложки GaAs и двух эпитаксиальных слоев, а именно покрывающего слоя $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ и слоя $Ga_{0.51}In_{0.49}P$. Постоянные кристаллических решеток для этих гетероструктур находятся между собой в следующем соотношении: $a_{Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}} > a_{Ga_xIn_{1-x}P} > a_{GaAs}$.

Профили рентгеновской (600) дифракции для остальных образцов были разложены на компоненты аналогичным образом.

Из разложения (600) дифракции для образца H162, приведенного на рис. 1б, видно, что экспериментальный дифракционный профиль имеет одну особенность в виде небольшого «плеча» справа от дифракционных максимумов, которые являются $K\alpha_{1,2}$ -дублетом от монокристаллической подложки GaAs (100). После разложения общей дифракции на компоненты мы также получили три $K\alpha_{1,2}$ -дублета: от покрывающего эпитаксиального слоя $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ и подложки GaAs (рис. 1а). Постоянные кристаллических решеток для этих гетероструктур находятся между собой в следующем соотношении: $a_{Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}} > a_{Ga_xIn_{1-x}P} > a_{GaAs}$.

Разложение на компоненты профиля рентгеновской (600) дифракции образца H200 (см. рис. 1с) показало, что общий профиль состоит из трех интенсивных $K\alpha_{1,2}$ -дублетов: от подложки GaAs(100), эпитаксиальных слоев $Ga_{0.50}In_{0.50}P$, «погруженного» четверного твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ и низкоинтенсивного $K\alpha_{1,2}$ -дублета от неизвестной фазы н.ф., сдвинутого относительно основного профиля дифракции в сторону меньших брэгговских углов.

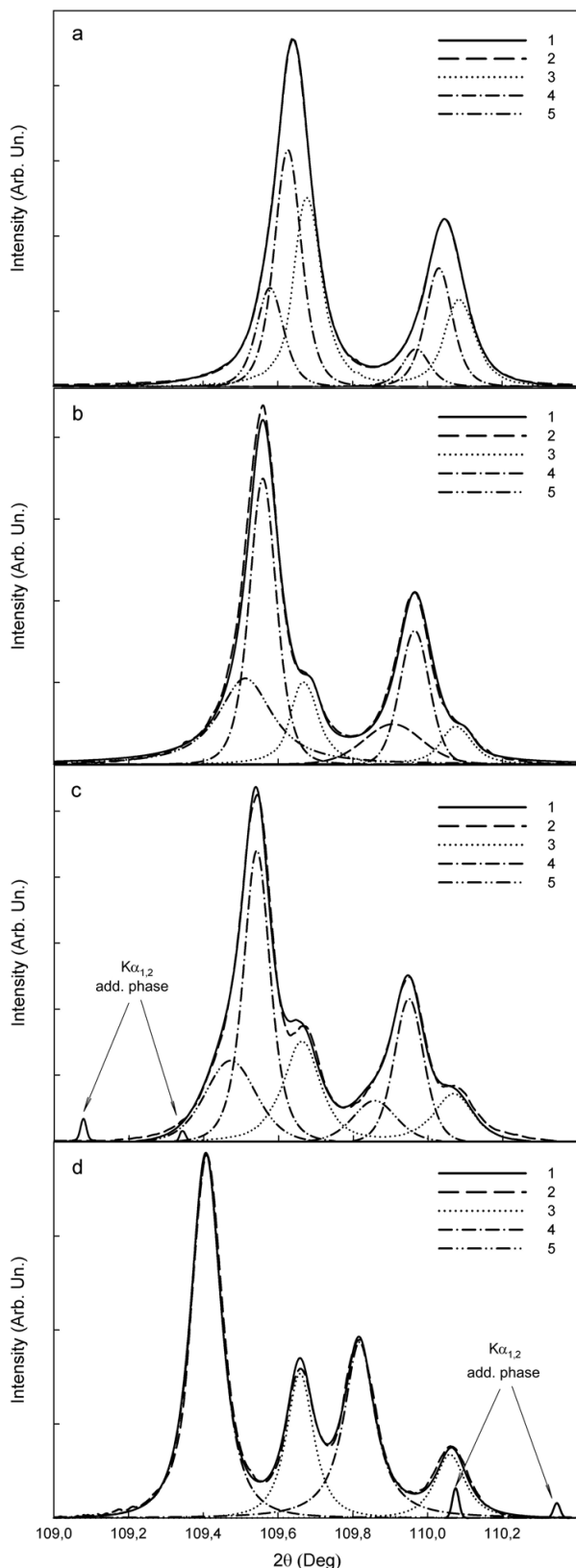


Рис. 1. Профили рентгеновской (600) дифракции от образцов гетероструктур H157, H162, H200 и H203. Линии дифракции на рисунках: 1 — эксперимент; 2 — аппроксимация; 3 — подложка GaAs (100), 4 — $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$; 5 — $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$

Такой же особенный дифракционный профиль имеет образец H203 (см. рис. 1d), который, как следует из результатов разложения, состоит из двух интенсивных дублетов: первый более интенсивный, являющийся наложением $K\alpha_{1,2}$ -дублетов от тройных эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{P}$ и «погруженного» слоя четверного твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, второй — монокристаллической подложки. Кроме того, помимо основного профиля (600) дифракции, присутствует дополнительный низкоинтенсивный $K\alpha_{1,2}$ -дублет от неизвестной фазы, сдвинутый в сторону больших брегговских углов.

Результаты разложения дифракционных профилей на компоненты: значения полуширин линий, межплоскостные расстояния и параметры решетки для всех компонент (600) дифракции гетероструктур и монокристаллической подложки GaAs(100) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты разложения дифракционных линий (600) исследуемых гетероструктур на компоненты (без учета внутренних напряжений)

№ образца	Компоненты гетероструктуры	Полуширина $2\theta, ^\circ$	$d^\perp, \text{Å}$	$a^\perp, \text{Å}$
H157	GaAs	0.09	0.9422	5.6532
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	0.09	0.9425	5.6548
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0.09	0.9427	5.6564
H162	GaAs	0.09	0.9422	5.6532
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	0.09	0.9429	5.6571
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0.14	0.9431	5.6588
H200	GaAs	0.09	0.9422	5.6532
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	0.09	0.9429	5.6577
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0.16	0.9434	5.6601
	Н.Ф.	0.09	0.9456	5.6739
H203	GaAs	0.09	0.9422	5.6532
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	0.09	0.9437	5.6624
	GaInAsP(TP)	0.15	0.9437	5.6624
	Н.Ф.	0.09	0.9399	5.6393

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК

$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$

Как уже было отмечено ранее, возникновение неоднородностей в эпитаксиальных твердых растворах $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, в первую очередь, было определено по спектрам фотолюминесценции, полученных при температурах ниже 77 К и обычно используемых для определения состава твердого раствора, поскольку в таких спектрах присутствовала дополнительная полоса в области низких энергий фотонов [6, 7]. Поэтому спектры фотолюминесценции от исследуемых нами гетероструктур также были получены при температуре жидкого азота $T=77$ К. На экспериментальных спектрах, приведенных на рис. 2—3, надписями отмечены: основная и дополнительная полосы от четверного твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, пик от слоя $Ga_xIn_{1-x}P$, а также стрелкой показано местоположение максимума полосы GaAs.

Спектры фотолюминесценции двухслойных гетероструктур (образцы H157 и H162) содержат две узкие основные полосы: высокоэнергетичная от тройного твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}P$ и низкоэнергетичная — основная полоса от твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ (рис. 2).

В тоже время спектры фотолюминесценции образцов гетероструктур со второй фазой (H200 и H203) помимо узких основных полос от тройного и четверного твердых растворов содержат дополнительную широкую полосу предположительно от поверхностных неоднородностей на основе твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ (рис. 3).

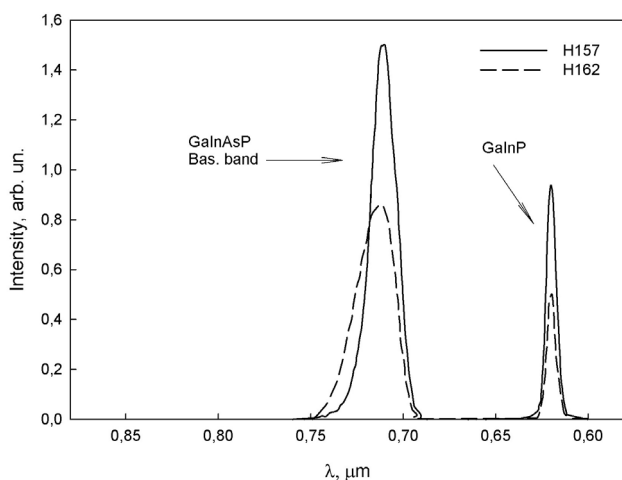


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции гетероструктур $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_xIn_{1-x}P/GaAs(100)$

Таблица 3. Значения длин волн излучения и ширины запрещенной зоны эпитаксиальных твердых растворов исследованных гетероструктур

№ образца	Принадлежность максимума фотолюминесценции $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Длина волны излучения λ , μm	Ширина запрещенной зоны E_g , eV
H157	Bas. band	0.711	1.739
H162	Bas. band	0.715	1.730
H200	Bas. band	0.670	1.846
	Add. band	0.752	1.644
H203	Bas. Band	0.671	1.843
	Add. band	0.747	1.655

Из экспериментальных данных по значениям длин волн максимумов фотолюминесценции можно определить ширину запрещенной зоны эпитаксиальных твердых растворов, используя линейную интерполяцию:

$$E_g = \frac{1.243}{\lambda} - \frac{1}{2}kT, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура.

В табл. 3. представлены экспериментальные значения длин волн максимумов фотолюминесценции при $T=77$ К и вычисленные по формуле (1) значения ширины запрещенной зоны для четверных твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ и доменов на их основе.

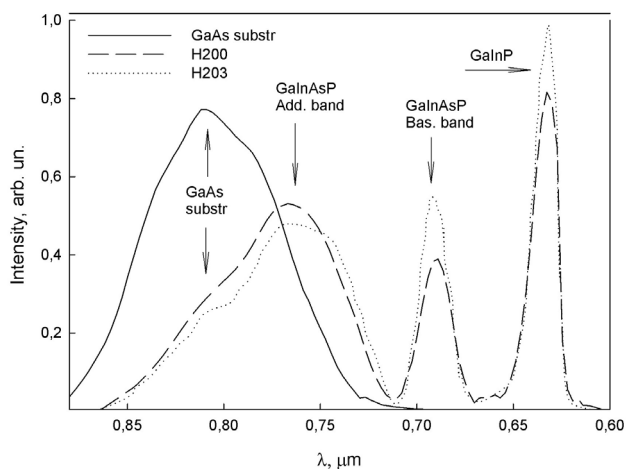


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции гетероструктур $Ga_xIn_{1-x}P/Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_xIn_{1-x}P/GaAs(100)$, в которых произошел распад эпитаксиального слоя GaInAsP

**АНАЛИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ
В РЕЗУЛЬТАТЕ КОМПЛЕКСНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТЫ
ПАРАМЕТРОВ И СОСТАВОВ КОМПОНЕНТ
ГЕТЕРОСТРУКТУР**

На основании данных рентгеноструктурного анализа, приведенных в табл. 2, мы можем определить параметры кристаллических решеток эпитаксиальных твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$, $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, а также неоднородностей, образовавшихся на поверхности, и определить фактические составы эпитаксиальных соединений, поскольку, как известно, термодинамика и кинетика ростовых процессов методом жидкофазной эпитаксии такова, что зачастую реальный состав может немного отличаться от технологически заданного.

Для определения постоянной решетки нижних (выращенных на подложке) твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ для всех гетероструктур с учетом упругих напряжений в гетероэпитаксиальном слое методом рентгеновской дифракции мы можем воспользоваться методикой и выражениями, описанными в [8—9]. Учитывая, что коэффициенты Пуассона для твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ подчиняются линейному закону:

$$v_{Ga_xIn_{1-x}P} = xv_{GaP} + (1-x)v_{InP}, \quad (2)$$

соотношение для a^v может быть записано как:

$$a_{Ga_xIn_{1-x}P}^v = a_{Ga_xIn_{1-x}P}^\perp \frac{1 - (xv_{GaP} + (1-x)v_{InP})}{1 + (xv_{GaP} + (1-x)v_{InP})} + a_{GaAs}^v \frac{2(xv_{GaP} + (1-x)v_{InP})}{1 + (xv_{GaP} + (1-x)v_{InP})} \quad (3)$$

Для расчета постоянной решеток твердых растворов коэффициенты Пуассона были взяты из литературных данных: $v_{GaP} = 0.306$ и $v_{InP} = 0.357$ [10]. При этом экспериментально определяемыми величинами оказывались лишь составляющие a^\perp постоянной решетки гетероэпитаксиальных структур, соответствующие измеренным величинам d .

Параметры решеток твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ с учетом внутренних напряжений a^v и их составы могут быть найдены из совместного решения уравнений (2)—(3) и закона Вегарда для системы GaP — InP, который имеет следующий вид:

$$a_{Ga_xIn_{1-x}P} = 5.8687 - 0.4182 \cdot x \quad (4)$$

Параметры решеток твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ для трехслойных гетероструктур находятся аналогичным образом, однако в формуле (3) вместо параметра решетки GaAs необходимо будет

использовать параметр решетки четверного твердого раствора, методика нахождения которого описана ниже.

Аналогичные выражения для параметров решетки с учетом внутренних напряжений и коэффициентов Пуассона в предположении линейного изменения обоих можно записать и для четверных твердых растворов:

$$v(x, y) = v_{InP}(1-x)(1-y) + v_{InAs}(1-x)y + v_{GaAs}xy + v_{GaP}x(1-y) \\ a_{Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}}^v = a_{Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}}^\perp \frac{1 - v(x, y)}{1 + v(x, y)} + a_{Ga_xIn_{1-x}P}^v \frac{2v(x, y)}{1 + v(x, y)} \quad (5)$$

Коэффициенты Пуассона соответственно равны: $v_{GaP} = 0.306$, $v_{InP} = 0.357$, $v_{GaAs} = 0.310$, $v_{InAs} = 0.352$ [10].

Линейный закон Вегарда для четверной системы задается следующим выражением:

$$a_{Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}} = 5.8687 + x(-0.4182) + y(0.1896) + xy(0.01315) \quad (6)$$

Что касается состава четверного твердого раствора, его можно определять, вводя зависимость состава от ширины запрещенной зоны [11], которая очень близка к линейной, но может и существенно отличаться от нее, проявляя экстремум или излом при определенном соотношении между компонентами. В частности, линейная интерполяция не применима для твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, в котором для определения $E_g(x, y)$ должно быть использовано нелинейное приближение. При комнатной температуре это выражение Куфала имеет следующий вид:

$$E_{gGa_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}} = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.758x^2 + 0.078y^2 - 0.069xy - 0.332x^2y + 0.03xy^2 \quad (7)$$

Константа 1.35 eV представляет ширину запрещенной зоны InP при $T = 300$ K [12].

Расчет параметров решеток и составов четверных твердых растворов и неоднородностей на их основе может быть выполнен лишь из совместного решения уравнений (5)—(7).

Параметры кристаллических решеток, а также составы эпитаксиальных слоев и неоднородностей, возникающих на поверхности трехслойных образцов приведены в табл. 4.

Таким образом, как следует из данных, полученных комплексной диагностикой многослойных гетероструктур (рис. 1—3, табл. 1 — табл. 4), на

Таблица 4. Параметры решеток и составы твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$, $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ и доменов в многослойных гетероструктурах

№ образца	Компоненты гетероструктур	a^{\perp} , Å	x	y	a^{\parallel} , Å
H157	GaAs	5.6532	—	—	5.6532
	$Ga_xIn_{1-x}P$	5.6548	0.51(3)	—	5.6540
	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	5.6564	0.6549	0.3048	5.6552
H162	GaAs	5.6532	—	—	5.6532
	$Ga_xIn_{1-x}P$	5.6571	0.51(0)	—	5.6551
	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	5.6588	0.6533	0.3102	5.6569
H200	GaAs	5.6532	—	—	5.6532
	$Ga_xIn_{1-x}P$	5.6577	0.50(8)	—	5.6555
	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	5.6601	0.5353	0.066	5.6578
	$Ga_xIn_{1-x}P$	5.6577	0.5044	—	5.6577
	Структурная неоднородность	5.6739	0.7365	0.4873	5.6578
H203	GaAs	5.6532	—	—	5.6532
	$Ga_xIn_{1-x}P$	5.6624	0.50(4)	—	5.6579
	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	5.6624	0.5249	0.0558	5.6602
	$Ga_xIn_{1-x}P$	5.6624	0.4959	—	5.6613
	Структурная неоднородность	5.6393	0.7747	0.5266	5.6499

поверхности «закрывающих» слоев $Ga_xIn_{1-x}P$ в тройных гетероструктурах могут возникать структурные неоднородности. Этот факт находит свое проявление в возникновении дополнительных (600) дифракционных отражений, что, как уже было показано в случае тройных твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ и $Ga_xIn_{1-x}P$, является свидетельством возникновения сверхструктурных фаз [13, 14]. Также в спектрах фотолюминесценции гетероструктур с доменами, помимо основной полосы четвертого твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, появляется дополнительная полоса, которую так же можно соотнести с четвертым соединением.

В литературе наиболее подробно описаны структурные свойства твердых растворов, изопериодических InP, однако в нашем случае, как видно из расчетных данных, четверные твердые растворы $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ попадают в область несмешиваемости и изопериодичны с GaAs.

Понятно, что четверной твердый раствор во время роста не находится в состоянии термодинамического равновесия. Ростовая система является открытой, т.е. существует постоянный приток атомов к растущей поверхности. Диффузия атомов существенна только в очень тонком приповерхностном слое, не более чем в несколько монослоев, а в остальной части образца диффузия «заморожена». Поверхность кристалла, в котором уже имеется модуляция состава, оказывает влияние на рост последующих слоев твердого раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, уширение дифракционных линий и полос фотолюминесценции может быть объяснено флуктуациями состава твердого раствора вблизи среднего значения, а сам твердый раствор состоит из областей различного состава, и распределения электронов в них независимы друг от

друга. Возникновение на поверхности мелкомасштабной доменной структуры обусловлено наличием напряжений внутри четверного слоя, а эти напряжения вызваны модуляцией состава твердого раствора, возникающей в результате спинодального распада «погруженного» четверного твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ по причине несмешиваемости его компонентов и релаксации параметра его кристаллической решетки к окружающим слоям.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-736.2011.2 и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы Проекты 2010-1.3.2-121-018-016 и 2010-1.3.1-121-018-030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pearsall T. P. GaInAsP alloy semiconductors. New York, Wiley, 1982.
2. Yamamoto T., Sakai K., Akiba S., et al. // IEEE J. Quantum Electron. 1978. V. 14. P. 95.
3. Nelson R. J. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 35. № 9. P. 654.
4. Bert N. A., Gorelenok A. T., Dzigasov A. G., et al. // J. Cryst. Growth. 1981. V. 52. P. 716.
5. Vavilova L. S., Kapitonov V. A., Murashova A. V., et al. // Semiconductors. 1999. V. 33. № 9. P. 1010—1012.
6. Mukai S. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 5. P. 2635.
7. Knauer A., Erbert G., Gramlich S., et al. // J. Electron. Mater. 1995. V. 24. № 11. P. 1655.
8. Seregin P. V., Domashevskaya É. P., Lukin A. N., et al. // Semiconductors. 2008. V. 42. № 9. P. 1055—1061.
9. Domashevskaya E. P., Seregin P. V., Lukin A. N., et al. // Surface and Interface Analysis. 2006. V. 8. P. 4.
10. Goldberg Yu. A. Handbook Series on Semiconductor Parameters, ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur. World Scientific, London, 1999.
11. Alperovich V. L., Bolkhovityanov Yu. B., Chikichev S. I., et al. // Semiconductors. 2001. V. 35. № 9. P. 1054—1062.
12. Lamberti C. Surface Science Reports. 2004. P. 53.
13. Domashevskaya E. P., Seregin P. V., Dolgopolaeva E. A., et al. // Semiconductors. 2005. V. 39. № 3. P. 336—342.
14. Середин П. В. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 3. С. 46—52.

Середин Павел Владимирович — к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры ФТТ и НС, Воронежский государственный университет; e-mail: paul@phys.vsu.ru

Глотов Антон Валерьевич — аспирант кафедры ФТТ и НС, Воронежский государственный университет

Терновая Вера Евгеньевна — аспирант кафедры ФТТ и НС, Воронежский государственный университет

Домашевская Эвелина Павловна — д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой ФТТ и НС, Воронежский государственный университет; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Арсентьев Иван Никитич — д.т.н., профессор, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С-Петербург; e-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru

Seregin Pavel V. — PhD, senior staff scientist, solid state physic and nanostructures chair, Voronezh State University; e-mail: paul@phys.vsu.ru

Glotov Anton V. — post graduate student, solid state physic and nanostructures chair, Voronezh State University

Ternovaya Vera Evgenyevna — post graduate student, solid state physic and nanostructures chair, Voronezh State University

Domashevskaya Evelina P. — grand PhD, professor, head of solid state physic and nanostructures chair, Voronezh State University; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Arsentyev Ivan N. — grand PhD, professor, Ioffe Physical and Technical Institute, Saint-Petersburg; e-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru