

Состав и параметры доменов, образующихся в результате спинодального распада четверных твердых растворов в эпитаксиальных гетероструктурах $\text{GaInP/Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{GaInP/GaAs}(001)$

© Э.П. Домашевская[¶], Н.Н. Гордиенко, Н.А. Румянцева, П.В. Середин, Б.Л. Агапов, Л.А. Битюцкая, И.Н. Арсентьев^{¶¶*}, Л.С. Вавилова*, И.С. Тарасов*

Воронежский государственный университет,
394006 Воронеж, Россия

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

(Получена 11 декабря 2007 г. Принята к печати 17 декабря 2007 г.)

Исследованы структурные и оптические свойства двухслойных и трехслойных эпитаксиальных гетероструктур, содержащих слои четверного твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. В трехслойных гетероструктурах обнаружено образование доменов в результате спинодального распада четверного твердого раствора. В результате в спектрах фотолюминесценции возникает дополнительная длинноволновая полоса, а на дифрактограммах линии (006) появляется дополнительный дублет $\text{CuK}\alpha_{1,2}$ -линии. На основании закона Вегарда и уравнения Куфала определены составы доменов.

PACS: 64.75.+g, 81.30.-t, 81.15.-z, 78.55.Cr, 61.10.Nz

1. Введение

В последние годы спонтанно сформированные периодические структуры стали предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований. Рост интереса к этому явлению объясняется прежде всего прогрессом точной экспериментальной техники, такой как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), позволяющие надежно и точно исследовать поверхность структуры с характерной периодичностью 10–100 нм. К тому же 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 наногетероструктуры, которые создают основу для новой технологии опто- и наноэлектроники нового поколения [1].

При послойном росте эпитаксиальных пленок твердых растворов полупроводников на основе $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ также могут возникать неоднородности состава и структуры. Широко известно явление несмешиваемости различных соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ в определенной области температур и составов, свидетельствующее о наличии неустойчивости при выращивании твердых растворов. Принципиально возможны два различных механизма неустойчивости: термодинамический и кинетический. Термодинами-

ческий тип неустойчивости обусловлен тем, что твердый раствор с неоднородным распределением состава может иметь меньшую свободную энергию, чем однородный твердый раствор. В связи с этим твердый раствор неустойчив относительно спонтанного разделения на фазы. Упругая энергия возникает вследствие требования когерентного (бездислокационного) сопряжения разделяющихся фаз. Однако подобное термодинамическое рассмотрение подразумевает, что диффузия атомов твердого раствора происходит во всем объеме эпитаксиальной пленки и может создавать профиль состава, соответствующий абсолютному минимуму свободной энергии системы. Такая ситуация могла бы иметь место в очень тонких слоях (порядка нескольких монослоев) при достаточно высоких температурах. В большинстве реальных экспериментов диффузия атомов существенна только в очень тонком приповерхностном слое, не более чем в несколько монослоев, а в остальной части образца диффузия „заморожена“. При эпитаксиальном росте в условиях спинодального распада первоначальное разделение фаз происходит в нескольких первых монослоях растущего твердого раствора. При последующей послойной эпитаксии новые слои твердого раствора вырастают на кристалле, в котором уже имеется модуляция состава. При этом пространственное распределение состава оказывается замороженным везде, кроме тонкой приповерхностной области (порядка нескольких монослоев). Имеющаяся в этой области диффузия стремится привести свободную энергию к условному минимуму, соответствующему замороженному составу в глубине уже выращенного эпитаксиального слоя.

При послойном росте твердого раствора может возникать и кинетическая неустойчивость, при которой упру-

[¶] E-mail: ftt@phys.vsu.ru

^{¶¶} E-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru

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

№ образца	Состав гетероструктур	Навески $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, мг			
		In	InP	Ga	InAs
H157	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs$ (001)	5000	91	95.5	1001
H162	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs$ (001)	5000	82.3	106.5	1099
H200	$Ga_{50}In_{0.50}P/Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.50}In_{0.50}P/GaAs$ (001)	5000	100	83	883
H203	$Ga_{0.49}In_{0.51}P/Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_{0.49}In_{0.51}P/GaAs$ (001)	5000	116	62.57	636.8

гие напряжения способствуют возникновению и последующему усилению пространственной модуляции состава. Этим кинетическая неустойчивость принципиально отличается от термодинамической неустойчивости, при которой упругие напряжения могли только стабилизировать твердый раствор. Показано, что для существования кинетической неустойчивости достаточно диффузии в очень тонком приповерхностном слое, толщиной всего в один–два монослоя [2].

В ряде работ, посвященных исследованию структурных и оптических свойств эпитаксиальных пленок твердых растворов (ТР) $GaInAsP$, показано, что возникновение особенностей в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) таких слоев вызвано наличием в них периодической доменной структуры [3–6].

Цель данной работы заключается в определении параметров решетки и состава доменов, образующихся при спинодальном распаде четверных твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ в составе тройных эпитаксиальных слоев, выращенных на монокристаллических подложках $GaAs$ (001) методом жидкофазной эпитаксии.

2. Объекты и методы исследования

В работе исследовались образцы, изготовленные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. На монокристаллических подложках $GaAs$ (001) были выращены эпитаксиальные слои тройных $GaInP$ и четверных $GaInAsP$ ТР методом жидкофазной эпитаксии (табл. 1). Рост осуществлялся в графитовой лодочке сдвигового типа методом принудительного охлаждения.

Образцы H157 и H162 состоят из двух эпитаксиальных слоев: тройного ТР $GaInP$, покрытого слоем четверного ТР $GaInAsP$. В этих образцах рост эпитаксиальных слоев $GaInAsP$ начинался при температуре $T_G = 750^\circ C$, при переохлаждении расплава $\Delta T = 1^\circ C$ и происходил при скорости охлаждения $V_{cool} = 0.08^\circ C/мин$ и времени роста $t_G = 5$ с.

Образцы H200 и H203 представляют собой трехслойную эпитаксиальную структуру, состоящую из слоя $GaInP$, слоя четверного ТР $GaInAsP$ и покрывающего слоя $GaInP$. Рост ТР $GaInAsP$ начинался при температуре $T_G = 750^\circ C$ ($\Delta T = 2^\circ C$) и происходил при скорости $V_{cool} = 0.08^\circ C/мин$ в течение $t_G = 40$ с.

Согласование параметров в гетероструктурах определяли методом рентгеновской дифракции с использованием $Cu_{K\alpha_{1,2}}$ -излучения на дифрактометре ДРОН-4-07 в режиме пошагового сканирования [7].

Микрофотографии поверхности и сколов образцов были сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM JSM 6380 LV, при ускоряющем напряжении ~ 30 кВ.

Морфологию поверхности исследовали на сканирующем зондовом микроскопе Femtoscan-001 в режиме атомно-силовой микроскопии с кантилевером CSC 12.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Морфология поверхности и сколов эпитаксиальных гетероструктур $GaInAsP/GaInP/GaAs$ (001) и $GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs$ (001)

Образцы H157 и H162 имеют довольно гладкую поверхность, нарушаемую в некоторых местах микродефектами в виде углублений (рис. 1, *b*, и 2, *b*). Исследование профилей этих образцов с использованием СЭМ показало, что гетероструктуры имеют высокую степень планарности.

В то же время исследование морфологии образцов H200 и H203 с тройным эпитаксиальным слоем показало, что на их поверхности наблюдается рельеф в виде статистического распределения неоднородностей — „микродоменов“, которые имеют размер около 20–25 мкм и ориентированы вдоль направления [110]. Наблюдаемые микродомены можно представить в виде прямоугольных параллелепипедов размерности $a \times b \times c$, где a — длина параллелепипеда, b — ширина, c — высота. Из эксперимента найдено, что эти величины находятся между собой в следующем соотношении: $b = a/3$ и $c = a/2$ (рис. 3, *b*, и 4, *b*). Исследование сколов образцов H200 и H203 показало наличие волнистого рельефа профилей тройных эпитаксиальных слоев, обусловленного появлением доменов в этих гетероструктурах $GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs$ (001) (рис. 5). Исследование этих же образцов на сканирующем зондовом микроскопе в атомно-силовом режиме показало, что „микродомены“ представляют собой образования с поперечной слоистой наноструктурой. Кроме

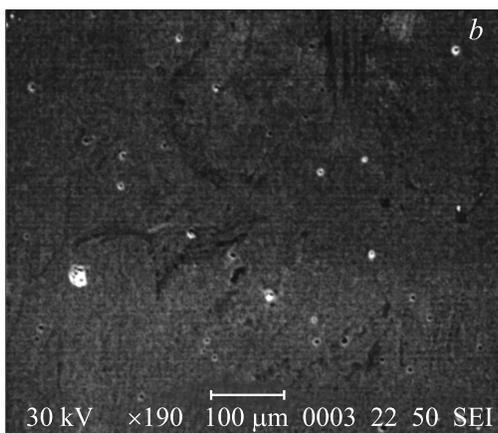
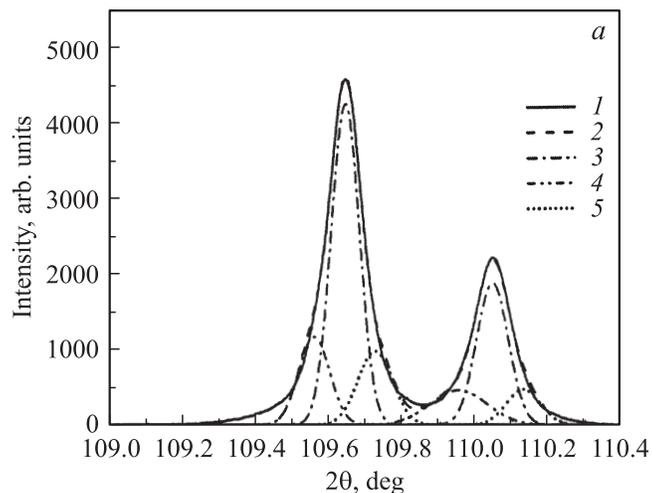


Рис. 1. *a* — разложение дифракционной линии (006) от гетероструктуры GaInAsP/GaInP/GaAs (001) образца N157. *1* — эксперимент, *2* — аппроксимация. *b* — линии дифракции от: *3* — Ga_{0.50}In_{0.50}P, *4* — Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}, *5* — подложки GaAs (001) и изображение поверхности.

того, на поверхности этих образцов было обнаружено множество доменов наноразмерного масштаба, которые могут объединяться в микродомены (рис. 6, *a, b*).

3.2. Дифрактометрические исследования

На рис. 7 приведена обзорная дифрактограмма образца N203, снятая во всем интервале углов 2θ . Она содержит три дифракционные линии: (002), (004) и (006). Для наших исследований была выбрана линия (006), 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 $\text{Cu}_{K\alpha_{1,2}}$ -излучения, а вклад от подложки в распределение интенсивности линии (006) значительно уменьшается.

Дифрактометрические исследования начали с изучения образца нелегированного арсенида галлия

GaAs (100) (АГН), который использовался в качестве эталонного образца. После обработки дифракционного профиля (сглаживания и вычитания фона) получили $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублет с соотношением интенсивностей $I_{K\alpha_2}/I_{K\alpha_1}$, равным 0.46. Величина постоянной решетки GaAs (001), измеренная нами, составила $5.653 \pm 0.001 \text{ \AA}$, что совпадает с литературными данными, приведенными в [7].

Сложность обработки дифракционных профилей от многослойных гетероструктур заключается в наличии большого числа накладывающихся $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублетов, что не позволяет простыми методами производить однозначное определение интенсивности максимумов линий. Важным критерием разложения дифракционных профилей является правильный выбор аналитической функции для описания формы дифракционного профиля. От выбора аналитической функции зависит не только величина погрешности, но и устойчивость разложения сложного профиля на составляющие, точность разделения накладывающихся максимумов.

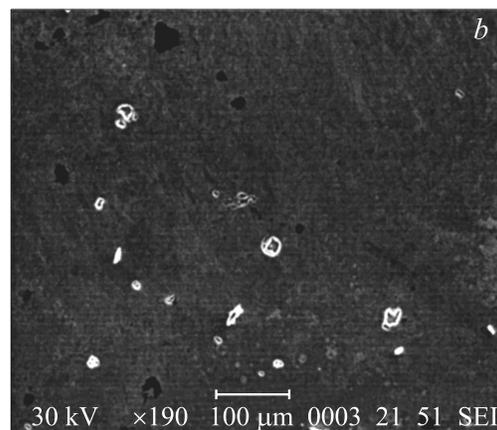
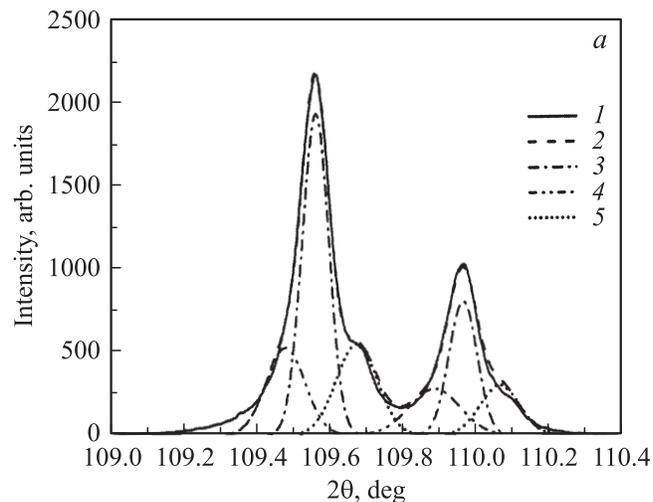


Рис. 2. *a* — разложение дифракционной линии (006) от гетероструктуры GaInAsP/GaInP/GaAs (001) образца N162. *1* — эксперимент, *2* — аппроксимация. *b* — линии дифракции от: *3* — Ga_{0.50}In_{0.50}P, *4* — Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}, *5* — подложки GaAs (001) и изображение поверхности.

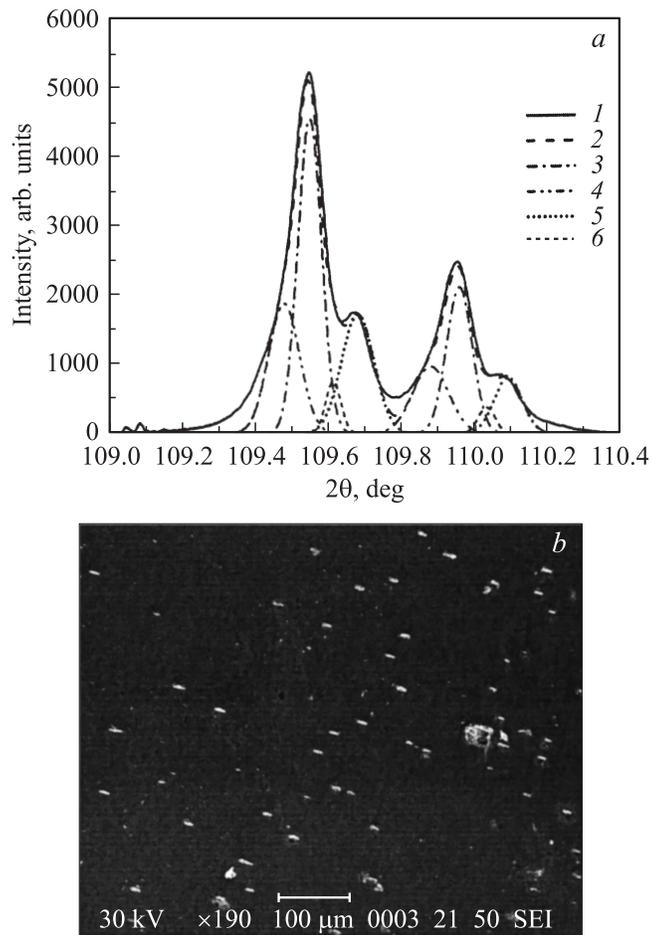


Рис. 3. *a* — разложение дифракционной линии (006) от гетероструктуры GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) образца H200. 1 — эксперимент, 2 — аппроксимация. *b* — линии дифракции от: 3 — Ga_{0.50}In_{0.50}P, 4 — четверного твердого раствора Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}, 5 — подложки GaAs (001), 6 — доменов и изображение поверхности.

Описание профилей дифракционных линий проводили с использованием функции Гаусса:

$$I(x) = I_0 \exp(-kx^2), \quad k = 0.6931/(\omega/2)^2,$$

где ω — полуширина линии.

При разложении экспериментальных дифракционных профилей на компоненты была использована программа „New profile 34“, в которой возможно использование аналитической функции Гаусса. Эта программа, перебирая массивы исходных данных, автоматически определяет максимумы и синтезирует аналитический профиль [8].

Так, несмотря на то обстоятельство, что дифракционный профиль от гетероструктуры образца H157, приведенный на рис. 1, *a*, имеет два дифракционных максимума, после разложения его на компоненты получили три $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублета: от подложки GaAs и двух эпитаксиальных слоев Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}, Ga_{0.51}In_{0.49}P. Экспериментальный дифракционный профиль образца H162 имеет

одну особенность в виде небольшого „плеча“ справа от дифракционных максимумов. После разложения на компоненты также получили три $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублета: от эпитаксиальных слоев Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}, Ga_{0.51}In_{0.49}P и под-

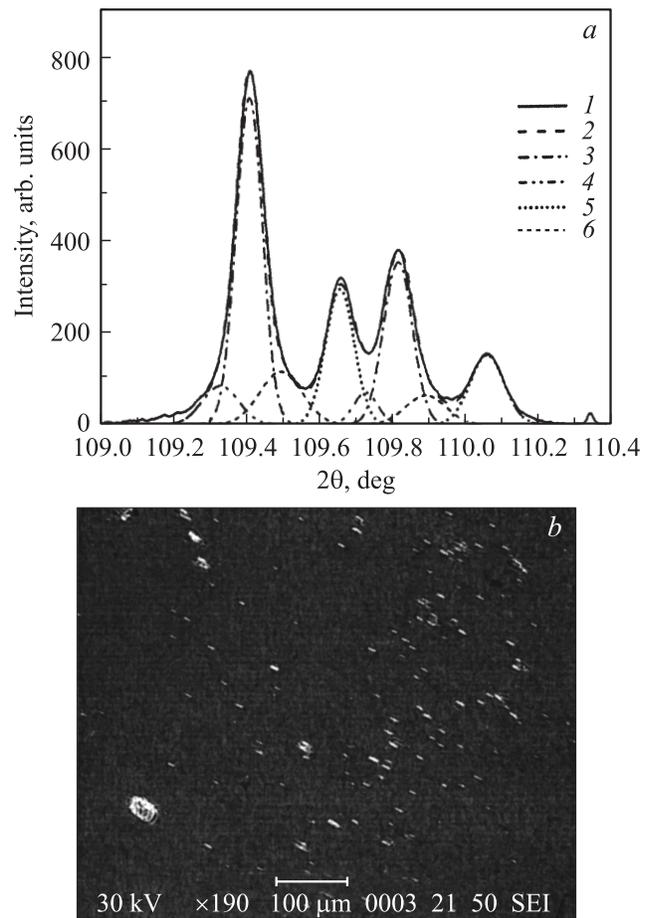


Рис. 4. *a* — разложение дифракционной линии (006) от гетероструктуры GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) образца H203. 1 — эксперимент, 2 — аппроксимация. *b* — линии дифракции от: 3 — Ga_{0.50}In_{0.50}P, 4 — четверного твердого раствора Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}, 5 — подложки GaAs (001), 6 — доменов и изображение поверхности.

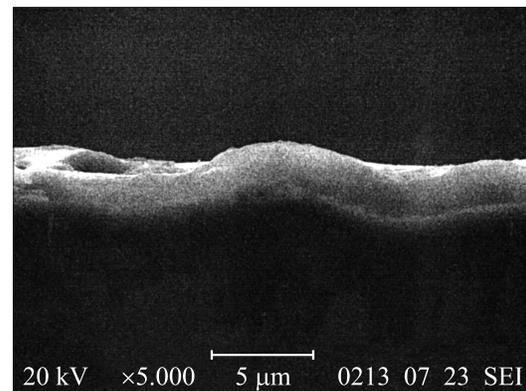


Рис. 5. Микрофотография скола эпитаксиальных гетероструктур GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001).

Таблица 2. Результаты разложения дифракционных линий (006) исследуемых гетероструктур на компоненты (без учета внутренних напряжений)

№ образца	Компоненты гетероструктуры	Полуширина, 2θ , deg	$I(K\alpha_2/K\alpha_1)$	$d_{\text{эпт}}^{\perp}$, Å	$a_{\text{эпт}}^{\perp}$, Å
H157	GaAs (001)	0.10	0.48	0.942	5.653
	GaInP	0.10	0.46	0.942	5.654
	GaInAsP	0.15	0.44	0.943	5.657
H162	GaAs (001)	0.10	0.49	0.942	5.653
	GaInP	0.10	0.47	0.943	5.657
	GaInAsP	0.14	0.54	0.943	5.660
H200	GaAs (001)	0.10	0.48	0.942	5.653
	GaInP	0.09	0.46	0.943	5.658
	GaInAsP (TP)	0.08	0.52	0.943	5.660
	GaInAsP (домены)	0.05	0.50	0.943	5.655
H203	GaAs (001)	0.10	0.51	0.942	5.654
	GaInP	0.09	0.49	0.944	5.662
	GaInAsP (TP)	0.11	0.58	0.944	5.665
	GaInAsP (домены)	0.14	0.56	0.943	5.659

ложки GaAs (рис. 2, а). Постоянные решеток для этих гетероструктур находятся между собой в следующем соотношении: $a_{\text{GaInAsP}} > a_{\text{GaInP}} > a_{\text{GaAs}}$.

Дифракционный профиль образца H200 имеет следующее существенное отличие: вместо „плеча“ справа от основных дифракционных максимумов появляются отдельные пики. После разложения на компоненты получили четыре $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублета: от подложки GaAs, эпитаксиального слоя $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}$, от четверного TP $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и доменов (рис. 3, а). Особенный дифракционный профиль наблюдается на образце H203, который имеет четыре хорошо разделенных максимума. После разложения на компоненты получили также четыре $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублета: от подложки GaAs, эпитаксиального слоя $\text{Ga}_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{P}$, от четверного TP $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и доменов (рис. 4, а). Постоянные решеток для этих гетероструктур находятся между собой в следующем соотношении: $a_{\text{GaInAsP(TP)}} > a_{\text{GaInP}} > a_{\text{GaInAsP(домены)}} > a_{\text{GaAs}}$. Результат разложения дифракционных профилей на компоненты, значения полуширин линий, соотношение интенсивностей, межплоскостные расстояния и параметры решетки представлены в табл. 2.

3.3. Фотолюминесценция эпитаксиальных пленок GaInAsP

Спектры ФЛ исследуемых гетероструктур были сняты при температуре $T = 77$ К. На спектрах ФЛ надписями отмечены: основная и дополнительная полосы от четверного TP GaInAsP, пик от слоя GaInP, а также стрелкой показано местоположение максимума полосы GaAs.

В спектрах ФЛ двухслойных гетероструктур (образцы H157 и H162) от TP GaInAsP наблюдается один пик — основная полоса (рис. 8).

В то же время в спектрах ФЛ образцов с доменами (H200 и H203) от TP GaInAsP наблюдаются две полосы: основная полоса — узкая и дополнительная широкая (рис. 9).

Из спектров фотолюминесценции по значениям длин волн максимумов ФЛ можно определить ширину запрещенной зоны TP, используя линейную интерполяцию:

$$E_g = \frac{1.24}{\lambda} - \frac{1}{2}kT, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, λ — длина волны, мкм.

В табл. 3 представлены экспериментальные значения длин волн максимумов ФЛ при $T = 77$ К и вычисленные по формуле (1) значения ширин запрещенной зоны при комнатной температуре ($T = 300$ К).

4. Определение состава четверных TP $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и доменов

После образования четверных TP $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ в кристаллической решетке происходит замещение атомов Ga и As атомами In и P. При этом значения постоянной

Таблица 3. Значения длин волн излучения и ширины запрещенной зоны четверного твердого раствора GaInAsP

№ образца	Длина волны излучения λ , мкм	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ
H157	Основная полоса: 0.704	1.64
H162	Основная полоса: 0.735	1.57
H200	Основная полоса: 0.688	1.68
	Доп. полоса: 0.768	1.49
H203	Основная полоса: 0.660	1.76
	Доп. полоса: 0.724	1.59

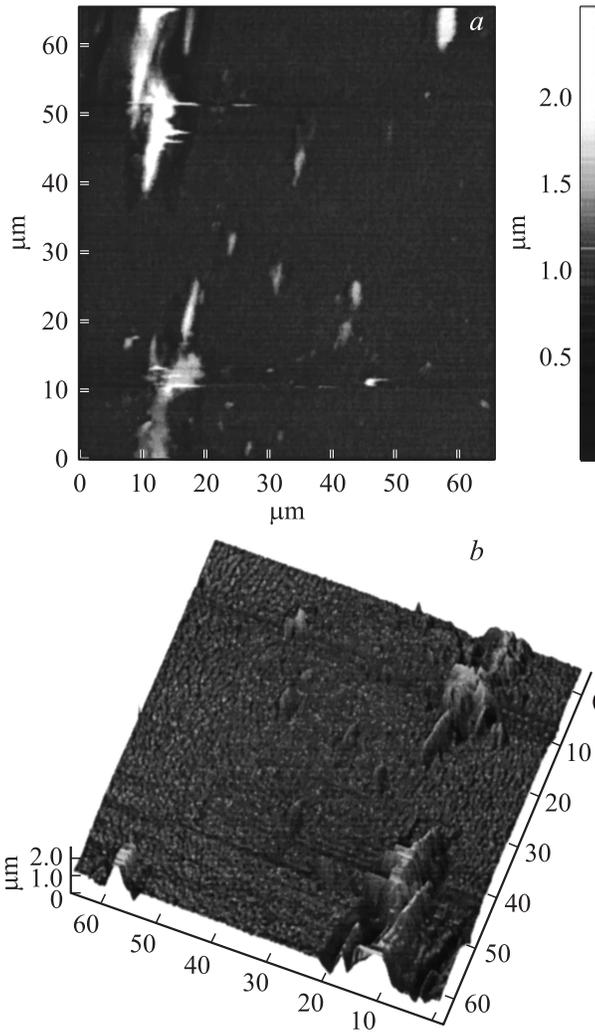


Рис. 6. Изображение участка поверхности $60 \times 60 \times 2$ мкм гетероструктуры GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) образца H200 (a, b).

кристаллической решетки могут изменяться в широком интервале значений в зависимости от состава и подчиняются закону Вегарда, который может быть представлен, в первом приближении, в виде линейной интерполяции:

$$a(x, y) = a_{\text{InP}}(1-x)(1-y) + a_{\text{InAs}}(1-x)y + a_{\text{GaAs}}xy + a_{\text{GaP}}x(1-y). \quad (2)$$

Состав ТР можно определять по изменению периода решетки с помощью дифракции рентгеновских лучей. Однако для четверных ТР GaInAsP одному значению постоянной решетки может соответствовать некоторый интервал составов. Поэтому с целью увеличения однозначности следует ввести зависимость состава еще от одной величины — ширины запрещенной зоны [9], 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 ТР GaInAsP, в котором для определения $E_g(x, y)$

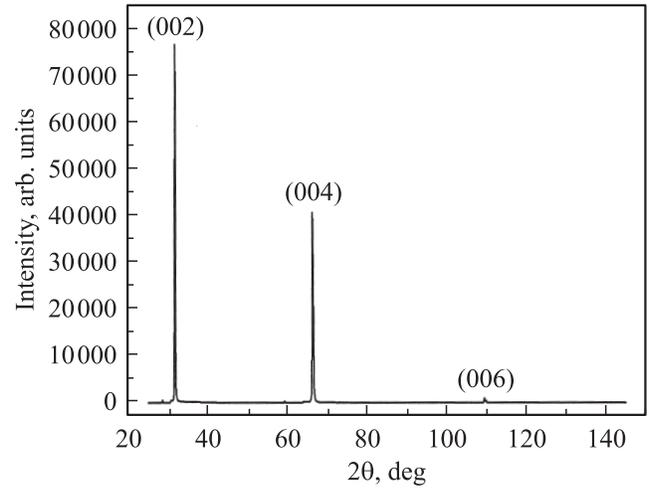


Рис. 7. Обзорная дифрактограмма эпитаксиальной гетероструктуры GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) образца H203.

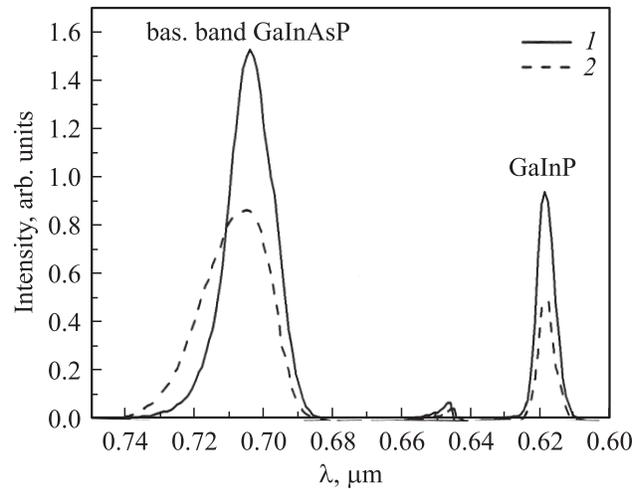


Рис. 8. Спектр ФЛ гетероструктуры GaInAsP/GaInP/GaAs (001) (образец H157) с одной полосой от слоя GaInAsP.

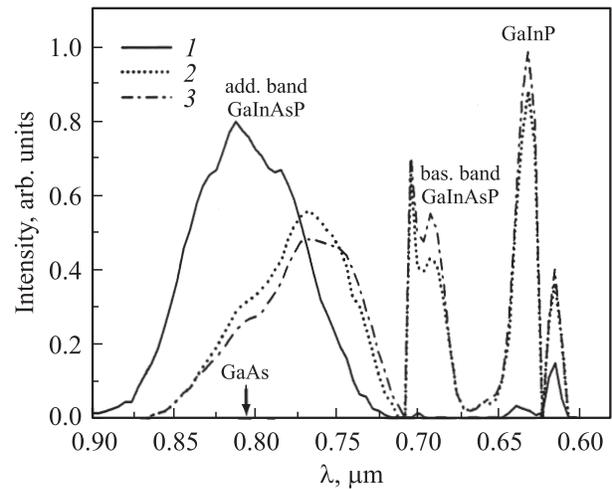


Рис. 9. Спектр ФЛ гетероструктуры GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) (образец H200), в котором произошел распад эпитаксиального слоя GaInAsP.

Таблица 4. Состав ТР $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ и доменов исследуемых образцов

№ образца	Состав твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	
H157		$Ga_{0.85}In_{0.15}As_{0.72}P_{0.21}$
H162		$Ga_{0.90}In_{0.10}As_{0.85}P_{0.15}$
H200	Домены	$Ga_{0.91}In_{0.09}As_{0.85}P_{0.15}$
	ТР	$Ga_{0.69}In_{0.31}As_{0.40}P_{0.60}$
H203	Домены	$Ga_{0.90}In_{0.10}As_{0.85}P_{0.15}$
	ТР	$Ga_{0.54}In_{0.46}As_{0.11}P_{0.89}$

должно быть использовано нелинейное приближение. При комнатной температуре это выражение Куфала имеет следующий вид:

$$E_g(x, y) = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.758x^2 + 0.078y^2 - 0.069xy - 0.0332x^2y + 0.03xy^2. \quad (3)$$

Константа 1.35 эВ представляет ширину запрещенной зоны InP при $T = 300$ К [10].

Из системы уравнений (2) и (3) можно определить, какую долю атомов Ga замещают атомы In, а атомы As замещают атомы P в ТР $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$. В табл. 4 приведены значения составов четверных ТР исследованных гетероструктур, а также доменов, образовавшихся в гетероструктурах с тройными эпитаксиальными слоями в результате спинодального распада четверных ТР.

При определении составов четверных ТР $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ следует учитывать тот факт, что InP, InAs и GaAs являются прямозонными полупроводниками, а GaP является непрямозонным. Совместное использование уравнений (2) и (3) возможно только в том случае, когда четверной ТР GaInAsP, составленный из этих бинарных компонент, является прямозонным. В точке перехода четверного ТР GaInAsP от прямозонного к непрямозонному полупроводнику использование уравнения Куфала становится некорректным.

5. Заключение

Комплексные исследования состава, структуры и морфологии двуслойных и трехслойных эпитаксиальных гетероструктур приводят к заключению, что при выращивании трехслойных гетероструктур GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) преобладает термодинамический механизм неустойчивости, когда при последующей послойной эпитаксии поверхностный слой GaInP вырастает на слое с модулированным составом и структурой, в котором образовались домены.

В результате проведенных исследований эпитаксиальных гетероструктур, содержащих слои четверных ТР, получены следующие результаты.

1. На поверхности гетероструктуры GaInP/GaInAsP/GaInP/GaAs (001) с тройными эпитаксиальными слоями

наблюдаются микродомены, ориентированные вдоль направления [110].

2. Микродомены представляют собой образования со слоистой поперечной наноструктурой, а их параметры находятся в следующем соотношении: $b = a/3$ и $c = a/2$ (a — длина, b — ширина, c — высота).

3. В результате образования доменов в трехслойных гетероструктурах возникает дополнительная длинноволновая полоса. Коротковолновые и длинноволновые полосы в спектрах ФЛ соответствуют излучательной рекомбинации в твердой фазе с различным составом и с ширинами запрещенных зон E_{g1} и E_{g2} .

4. На дифрактограммах образцов, имеющих дополнительную полосу в спектрах фотолюминесценции, также присутствует дополнительный $K_{\alpha_{1,2}}$ -дублет от доменов определенного состава, имеющих меньший параметр решетки.

5. Составы доменов, образующихся при спинодальном распаде эпитаксиальных четверных ТР $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, определены на основании закона Вегарда и уравнения Куфала.

Авторы выражают благодарность А.В. Мурашовой за критические замечания при обсуждении полученных результатов.

Работа поддержана грантом РФФИ 06-02-96313 р-центр-а.

Список литературы

- [1] V.A. Shchukin, D. Bimberg. Phys., Rev., **71**, 4 (1999).
- [2] В.Г. Малышкин, В.А. Щукин. ФТП, **27**, 1931 (1993).
- [3] Л.С. Вавилова, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, И.С. Тарасов. ФТП, **34**, 1307 (2000).
- [4] Н.А. Берг, Л.С. Вавилова, И.П. Ипатова, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, А.А. Ситникова, И.С. Тарасов, В.А. Щукин. ФТП, **33**, 544 (1999).
- [5] Л.С. Вавилова, Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, В.Н. Неведомский, Н.К. Полетаев, А.А. Ситникова, И.С. Тарасов, В.В. Шамахов. ФТП, **37**, 1104 (2003).
- [6] Л.С. Вавилова, В.А. Капитонов, Д.А. Лившиц, А.В. Лютецкий, А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, Г.В. Скрынников, И.С. Тарасов. ФТП, **34**, 325 (2000).
- [7] Э.П. Домашевская, П.В. Середин, Э.А. Долгополова, И.Е. Занин, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов. ФТП, **39**, 354 (2005).
- [8] М.В. Решетняк. Автореф. канд. дис. (Харьк. гос. политех. ун-т, Харьков, 2003).
- [9] В.Л. Альпетович, Ю.Б. Болховитянов, С.И. Чикичев, А.Г. Паулиш, А.С. Терехов, А.С. Ярошевич. ФТП, **35**, 1102 (2001).
- [10] C. Lamberti. Surf. Sci. Rep., **53**, 1 (2004).

Редактор Л.В. Беляков

**Composition and parameters
of domains formed as a result
of spinodal decomposition
of quaternary alloys in the epitaxial
GaInP/Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/GaInP/GaAs (001)
heterostructures**

*E.P. Domashevskaya, N.N. Gordienko,
N.A. Rumyantseva, B.L. Agapov, P.V. Seredin,
L.A. Bityutskaya, I.N. Arsent'ev*, L.S. Vavilova*,
I.S. Tarasov**

Voronezh State University,
394006 Voronezh, Russia
* Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Two-layer and three-layer epitaxial heterostructures including the layers of quaternary Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} alloy were investigated in the work. In three-layer heterostructures domains formation was found to be due to the spinodal decomposition of quaternary alloy. As a result, an additional long-wave band there appears in the photoluminescence spectra and additional Cu_{Kα1,2} doublet line can be observed in X-ray patterns of (006) line. Domains composition was determined basing on Vegard's law and Kouphal equation.