

# Латеральное упорядочение квантовых точек и нитей в многослойных структурах (In,Ga)As/GaAs (100)

© В.В. Стрельчук<sup>¶</sup>, П.М. Литвин, А.Ф. Коломыс, М.Я. Валах, Yu.I. Mazur<sup>+</sup>, Zh.M. Wang<sup>+</sup>, G.J. Salamo<sup>+</sup>

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

<sup>+</sup> Department of Physics, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, 72701

(Получена 3 апреля 2006 г. Принята к печати 7 апреля 2006 г.)

Исследованы морфология поверхности и оптические свойства многослойных структур (In,Ga)As/GaAs(100) с самоорганизованными квантовыми точками и квантовыми нитями, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Обнаружено, что упорядоченное расположение квантовых точек в плоскости гетерограницы начинает формироваться при выращивании первых периодов многослойной структуры. При увеличении количества периодов наблюдается выстраивание квантовых точек в ряды и формирование нитей вдоль направления  $[0\bar{1}1]$ . Повышение латеральной упорядоченности рассматриваемых структур коррелирует с увеличением оптической анизотропии излучения, обусловленной анизотропией релаксации упругих деформаций и формой нанобъектов. Обсуждается возможный механизм латерального упорядочения квантовых точек и нитей в многослойных структурах, включающий как эффекты анизотропии полей деформаций и диффузии адатомов, так и упругое взаимодействие соседних квантовых точек.

PACS: 68.65.Hb, 68.65.La, 78.67.Hc, 78.67.Lt, 78.55.Cr

## 1. Введение

Самоорганизованный рост квантовых точек (КТ) и квантовых нитей (КН) (In,Ga)As по механизму Странского–Крастанова при молекулярно-пучковой эпитаксии напряженных гетеросистем является одним из наиболее перспективных методов нанотехнологии. Интерес к таким системам вызван перспективами их применения в оптоэлектронике. Важным при этом является однородность размеров и формы КТ и КН и их упорядоченное расположение. Поскольку размер КТ определяется площадью, с которой „собираются“ адатомы, повышение однородности размеров КТ может быть реализовано при упорядоченном расположении мест зарождения КТ. При выращивании многослойных гетероструктур с квантовыми точками места предпочтительного зарождения самоорганизованных КТ на ростовой поверхности определяются локальным распределением упругих поверхностных деформаций, вызванных КТ предыдущего слоя (барьерными КТ). При небольших толщинах разделяющего слоя это приводит к вертикально-коррелированному выстраиванию КТ [1]. При этом уменьшается дисперсия размеров КТ, а их средний размер несколько увеличивается. В то же время латеральное упорядочение КТ (в плоскости гетерограницы), а тем более их выстраивание в одномерные цепочки или образование поверхностной упорядоченной двумерной сетки продолжает оставаться актуальной задачей. Ранее для многослойных структур было показано [2], что в зависимости от степени упругой анизотропии и толщины разделяющего слоя пространственное распределение КТ может изменяться от вертикально-коррелированного до анти-коррелированного со значительно более высоким латеральным упорядочением. Так, например, для КТ

(In,Ga)As/GaAs (100) [3] реализовано наклонное вертикальное выстраивание однородных по размеру КТ, а в системе PbSe/PbEuTe получена трехмерная решетка, образованная КТ [4].

Латеральное упорядочение может повышаться в плотных массивах КТ вследствие упругого взаимодействия растущих соседних КТ из-за перекрытия их деформационных полей в подложке [5]. Например, в случае однослойных структур InAs/GaAs(100) этот эффект приводил к более высокой степени корреляции ближнего порядка во взаимном расположении КТ вдоль жестких кристаллографических направлений  $[0\bar{1}1]$  и  $[011]$  по сравнению с мягким направлением  $[100]$  [6]. Вопросы латерального упорядочения в однослойных структурах InAs/GaAs (100) рассматривались в работах [7,8].

Недавно мы показали, что для многослойных структур (In,Ga)As/GaAs (100) можно реализовать латеральное выстраивание КТ в ряды [9]. При этом использовался процесс прерывания роста на начальных этапах осаждения разделяющего слоя GaAs. Это приводило к анизотропии деформационного поля разделяющего слоя, вызванной асимметрией формы барьерных КТ. Подобный эффект наблюдался и при термическом отжиге КТ (In,Ga)As, покрытых тонким слоем GaAs [10]. Однако механизм такого спонтанного латерального упорядочения до конца не ясен.

В данной работе методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) и фотолюминесценции (ФЛ) исследованы латерально-упорядоченные многослойные наноструктуры (In,Ga)As/GaAs. В то время как спектр ФЛ дает сведения об энергии электронных уровней, исследование поляризации излучения дает информацию об анизотропии электронных состояний. Исследование зависимости поляризации излучения самоорганизованных КТ и КН от геометрической анизотропии их формы и латерального

<sup>¶</sup> E-mail: strelch@isp.kiev.ua

Данные АСМ и фурье-анализа для многослойных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 

Технологические параметры образцов			Направление	Параметры КТ (КН) из АСМ-данных				Результаты фурье-анализа АСМ-данных		$w/d$	
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	GaAs	число периодов		$w$ , нм	$\rho$ , мкм <sup>-2</sup>	$h$ , нм	$f$ , %	$\delta$	$d$ , нм		
$x$	толщина, МС										
0.5	9.8	60	2	[011]	41.10	300	5	33	8.90	74.67	0.55
0.5	9.8	60	7	[011]	50.50	286	8	29	8.20	77.41	0.65
0.5	9.8	60	9	[011]	55.50	133	11	25	6.93	78.13	0.71
0.4	7.6	67	17	[011]	48.20	190	7	13	2.72	110.65	0.44
				[0 $\bar{1}$ 1]	49.70				4.10		
0.3	11.5	67	17	[011]	77.20	9	7	38	2.31	101.16	0.76
0.3	16.3	67	17	[011]	78.04	11	8	43	2.98	89.7	0.87

Примечание.  $\delta$  — полуширина фурье-максимума.

упорядочения может быть полезным для оптимизации характеристик лазеров, использующих массивы КТ и КН как активные слои [11,12]. Поляризационные свойства излучения КТ исследуются относительно редко. Некоторые результаты были получены с использованием методов катодолюминесценции [13], спектров возбуждения [14] и фотоломинесценции [15,16]. Оптическая анизотропия излучения КТ (In,Ga)As, выращенных на GaAs (100), связывалась с геометрической анизотропией формы КТ (эллиптической формой КТ с большой полусью вдоль направления [011]) [11]. Поляризация ФЛ КТ InAs, выращенных на поверхностях (311), согласуется с удлиненностью формы КТ вдоль направления [233] [17].

В данной работе представлены результаты исследования влияния количества периодов и состава слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на морфологию поверхности и оптическую анизотропию самоорганизованных пространственно упорядоченных массивов квантовых точек и нитей. Показано, что периодическое расположение КТ в плоскости гетерограницы начинает проявляться уже для двухпериодной структуры. При увеличении количества периодов наблюдается повышение латерального упорядочения и однородности размеров КТ и КН во взаимно перпендикулярных направлениях [0 $\bar{1}$ 1] и [011]. Показано, что этот факт коррелирует с ростом оптической анизотропии излучения, обусловленной анизотропией релаксации упругих деформаций и формой нанобъектов.

## 2. Методика эксперимента

Все структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на полуизолирующих подложках GaAs ориентации (100). После удаления с их поверхности окисного слоя (температура подложки  $T_s \approx 650^\circ\text{C}$ ) выращивался буферный слой GaAs толщиной 0.5 мкм ( $T_s \approx 600^\circ\text{C}$ , скорость роста 1 монослой в секунду, 1 МС/с). Затем температура подложки понижалась до  $540^\circ\text{C}$  и выращивалась активная часть, представлявшая собой от 2 до 17 периодов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  (100). Номинальная концентрация индия в многослойных структурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  (100)

составляла  $x = 0.30-0.50$ . Скорость роста GaAs и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  была 0.4 и 0.8 МС/с соответственно. Рост всех образцов осуществлялся при постоянном давлении паров As, равном  $1 \cdot 10^{-5}$  Торр. Более детально режимы роста описаны в [9]. Параметры образцов приведены в таблице.

Переход от псевдоморфной двумерной (2D) моды роста к образованию трехмерных (3D) островков контролировался по дифракции высокоэнергетических электронов. Для структур  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ (9.8 МС)/GaAs(60 МС) переход 2D–3D для первого слоя InGaAs реализовался при достижении толщины  $d_{\text{InGaAs}} = 4.0$  МС, а на последующих слоях — при  $\sim 3.4$  МС.

Морфология поверхности образцов исследовалась *ex situ* с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа Nanoscope IIIa.

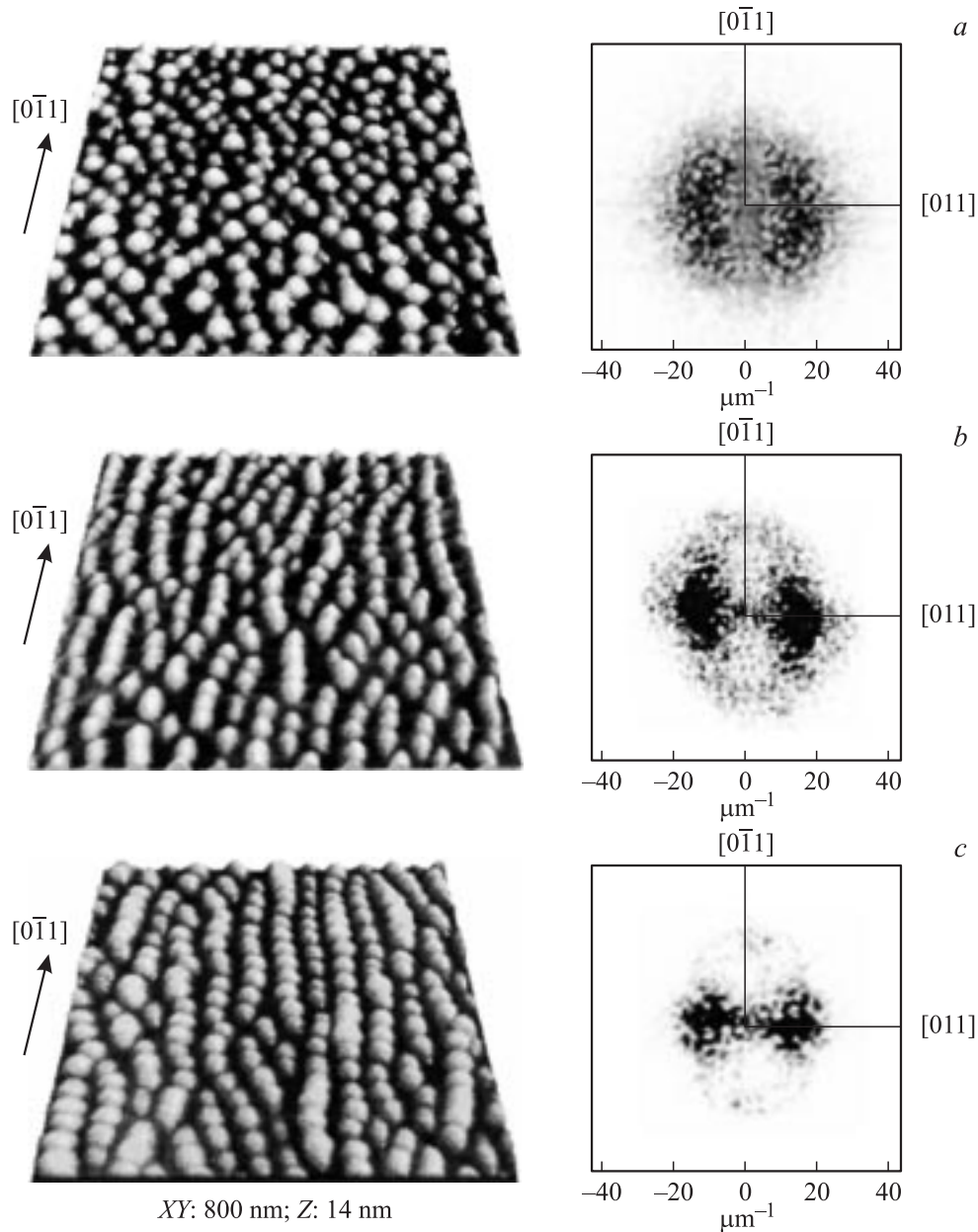
Фотоломинесценция структур возбуждалась излучением Nd:YVO<sub>4</sub>-лазера с длиной волны 532 нм (энергия фотона  $E_{\text{exc}} = 2.33$  эВ). Спектры регистрировались с использованием спектрометра TRIAX-550 и системы регистрации с охлаждаемой CCD-камерой (OMA V: 512-1.7).

Поляризация ФЛ анализировалась поляризатором Глана–Томпсона и пленочной широкополосной волновой пластинкой  $\lambda/4$  ( $\lambda/2$ ) (Achromatic Zero-order Waveplate IORP44-4 (IORP42-4)), которые размещались перед входной щелью монохроматора. Дополнительно проводились контрольные поляризационные измерения от одной точки образца при его вращении на  $90^\circ$  для исключения зависимости поляризационной анизотропии излучения от ориентации образца в криостате.

Наши предыдущие электронно-микроскопические исследования показали, что в многослойных структурах (In,Ga)As/GaAs, выращенных при аналогичных технологических режимах, реализуется вертикально-коррелированное расположение КТ [18].

## 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны АСМ-изображения верхнего непокрытого слоя КТ (In,Ga)As и соответствующие им 2D фурье-преобразования для 2-, 7- и 9-периодной струк-



**Рис. 1.** Трехмерные АСМ-изображения фрагментов поверхности многослойных структур  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$  (слева) и их двумерное фурье-преобразование (справа): *a* — 2 периода, *b* — 7 периодов, *c* — 9 периодов.

тур  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  (9.8 МС)/ $\text{GaAs}$  (60 МС). Из АСМ-данных следует, что с ростом числа периодов средние латеральные размеры КТ ( $w$ ) увеличиваются от 41 до 55 нм, а плотность КТ ( $\rho$ ) уменьшается от 300 до  $133 \text{ мкм}^{-2}$  (см. таблицу). Среднее значение высоты КТ ( $h$ ) увеличивается от 5 до 11 нм. Они имеют относительно узкое распределение размеров и несколько удлиненную форму основания вдоль кристаллографического направления  $[0\bar{1}1]$ , что наблюдалось и ранее [19]. Доля поверхности, занятой КТ, достаточно высокая ( $f \approx 30\%$ ), в результате чего соседние КТ могут эффективно взаимодействовать друг с другом с появлением эффектов корреляции во взаимном расположении КТ. Поэтому аналогично рабо-

те [20] мы использовали отношение размеров  $w/d$  как параметр, характеризующий поверхностную плотность КТ, где  $w$  — средний латеральный размер КТ (КН) и  $d$  — среднее расстояние между ближайшими КТ (КН). Ожидается, что при  $w/d > 0.5$  соседние КТ начинают эффективно взаимодействовать друг с другом [20,21]. В нашем случае с увеличением количества периодов (рис. 1) отношение  $w/d$  увеличивается от 0.55 до 0.70 в направлении, параллельном  $[011]$  (см. таблицу).

Степень упорядочения КТ была исследована с помощью фурье-анализа АСМ-изображений размером  $5 \times 5 \text{ мкм}$ . На картине 2D фурье-преобразования 2-периодного образца (рис. 1, *a*) наблюдаются два максимума в

направлении  $[0\bar{1}1]$ , которые заметно размыты в направлении  $[0\bar{1}1]$ . Наличие таких максимумов указывает на то, что некоторая периодичность КТ в направлении  $[0\bar{1}1]$  проявляется уже со второго периода структуры. При увеличении количества периодов упорядоченности КТ в плоскости слоя повышается (наблюдается образование цепочек КТ). Это приводит к значительному уменьшению размытия фурье-максимумов, свидетельствующему об уменьшении нерегулярных отклонений ориентации цепочек КТ от направления  $[0\bar{1}1]$  (рис. 1, *b, c*). При увеличении количества периодов от 2 до 9 среднее расстояние  $d$  между цепочками КТ (центрами КТ) в направлении  $[0\bar{1}1]$  увеличивается от  $\sim 75$  до  $\sim 78$  нм.

Латеральное выстраивание КТ в цепочки вдоль направления  $[0\bar{1}1]$  не может быть объяснено только лишь на основе анизотропии упругих констант разделяющего слоя GaAs, которые предсказывают упорядочение в направлениях  $\langle 100 \rangle$ , соответствующих минимумам тензора упругости [19]. Это означает, что в нашем случае кинетические эффекты и упругое взаимодействие соседних КТ более эффективно влияют на процесс роста КТ по сравнению с анизотропией упругих свойств разделяющего слоя.

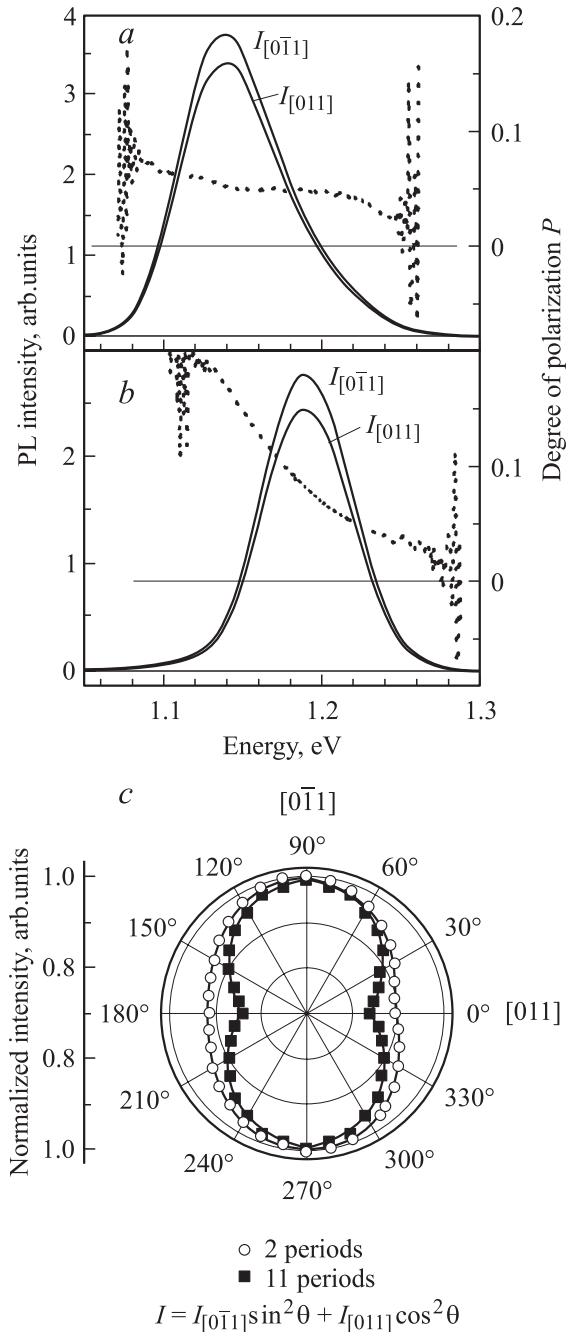
Причина этого, во-первых, состоит в том, что при осаждении слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  на GaAs (100) длина поверхностной диффузии адатомов катионов вдоль направлений  $[0\bar{1}1]$  больше, чем вдоль  $[011]$ , (отношение длин  $D_{[0\bar{1}1]}/D_{[011]} \approx 10$  [22]) вследствие анизотропии поверхностной морфологии As-стабилизированной поверхности GaAs (например, монослойных неровностей, свойственных поверхности  $2 \times 4$  GaAs [9]). В результате реализуется заметно анизотропный массоперенос в процессе роста КТ.

Во-вторых, локальное неоднородное распределение деформаций, обусловленное несимметричностью формы индивидуальных КТ, может усиливать диффузию адатомов из более напряженных областей в слабо напряженные. Поскольку поля упругих деформаций от границ КТ значительно быстрее спадают в упруго-жестких направлениях  $\langle 011 \rangle$  по сравнению с мягкими направлениями  $\langle 100 \rangle$ , скорость зарождения КТ будет выше в направлениях  $\langle 011 \rangle$  по сравнению с направлениями  $\langle 100 \rangle$  [5].

В-третьих, в многослойной структуре латеральное упругое взаимодействие соседних КТ и взаимодействие деформационных полей поверхностных и барьерных КТ через перекрытие полей упругих деформаций в разделяющем слое GaAs может способствовать упорядочению пространственного распределения КТ на поверхности [23].

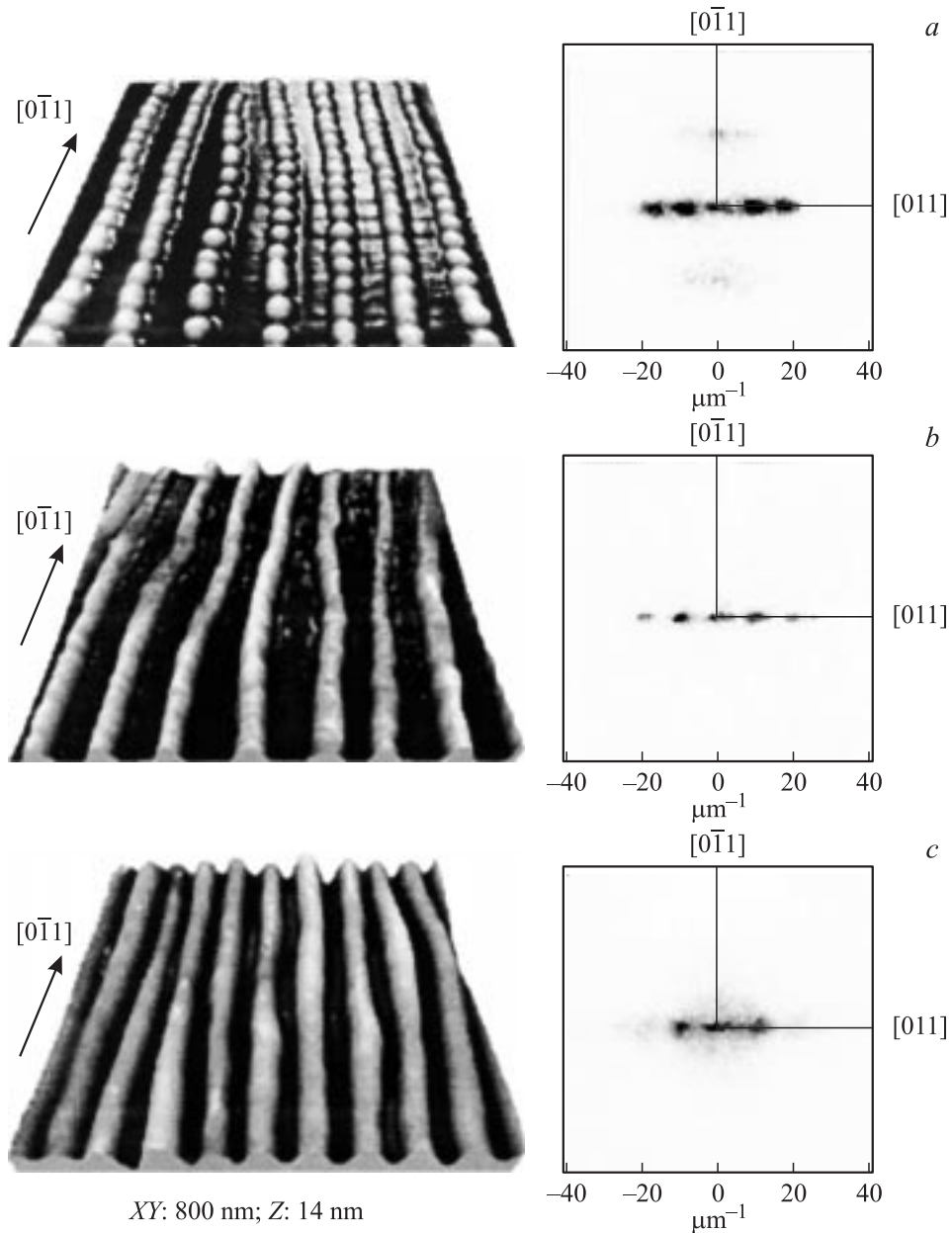
Таким образом, мы считаем, что в нашем случае отмеченные эффекты поверхностной анизотропии полей деформаций и диффузии адатомов, а также взаимодействие упругих деформационных полей индивидуальных КТ могут быть ответственными за латеральное упорядочение массивов КТ.

Дальнейшие исследования показали, что повышение латеральной упорядоченности коррелирует с увеличением оптической анизотропии излучения КТ (In,Ga)As.



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции (PL) 2- (*a*) и 11-периодных (*b*) структур  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$  при линейной поляризации излучения параллельно направлениям  $[0\bar{1}1]$  ( $I_{[0\bar{1}1]}$ ) и  $[011]$  ( $I_{[011]}$ ). *a, b*: пунктирная линия — степень линейной поляризации  $P = (I_{[0\bar{1}1]} - I_{[011]}) / (I_{[0\bar{1}1]} + I_{[011]})$ . *c* — угловое распределение интенсивности  $I$  линейно поляризованного света.  $E_{\text{exc}} = 2.33$  эВ,  $T = 8$  К, плотность мощности  $0.1$  Вт/см<sup>2</sup>.

На рис. 2, *a, b* показаны спектры ФЛ при температуре  $T = 8$  К и возбуждении с энергией кванта  $E_{\text{exc}} = 2.33$  эВ для двух направлений поляризации: параллельно  $[0\bar{1}1]$  ( $I_{[0\bar{1}1]}$ ) и параллельно  $[011]$  ( $I_{[011]}$ ). Угловое распределение интенсивности в максимуме полосы линейно поляризованного излучения для 2- и 11-периодных структур



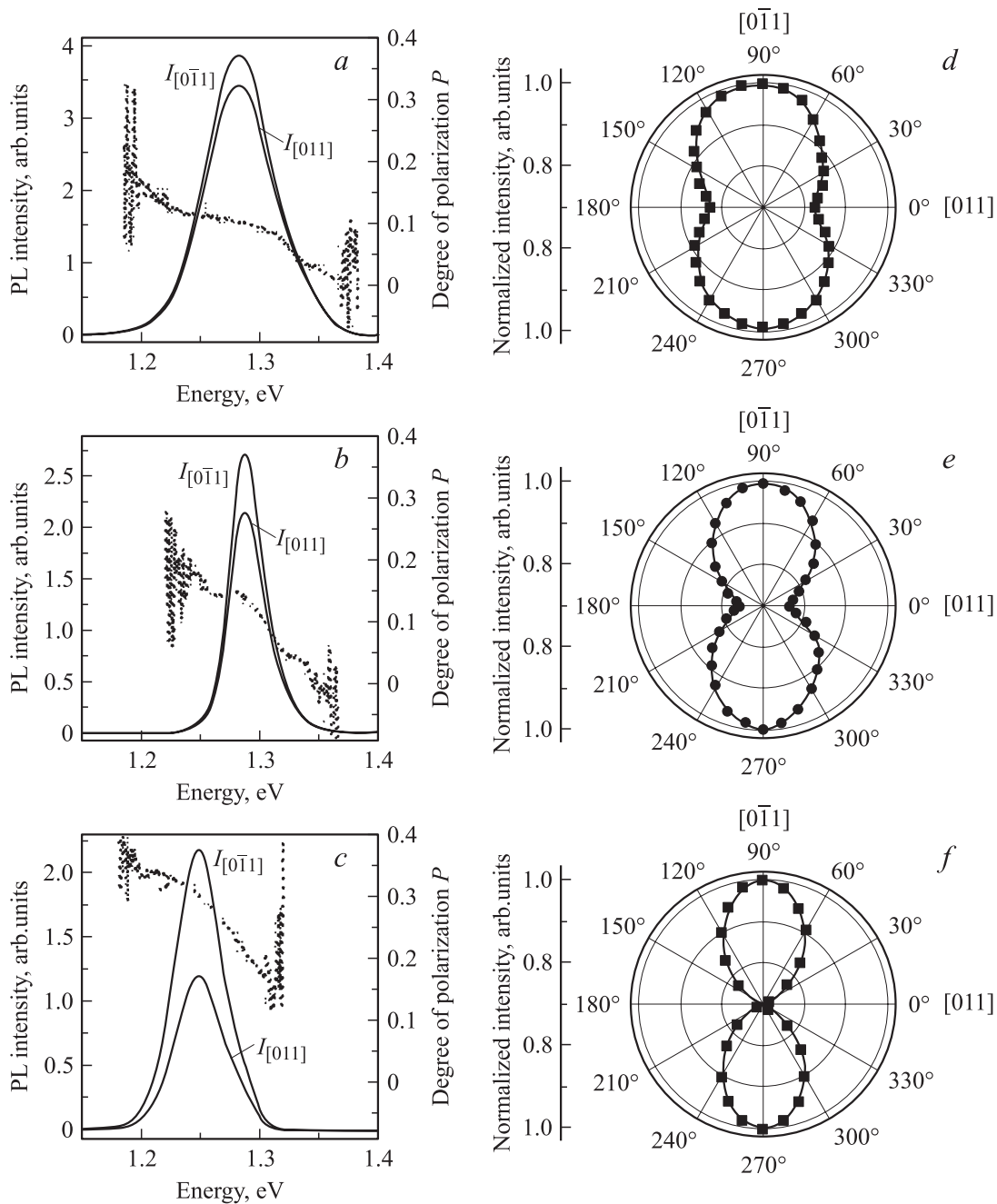
**Рис. 3.** Трехмерные АСМ-изображения фрагментов поверхности 17-периодных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  (слева) и их двумерное фурье-преобразование (справа). *a*:  $x = 0.40$ ,  $d_{\text{InGaAs}} = 7.6 \text{ MC}$ ; *b*:  $x = 0.30$ ,  $d_{\text{InGaAs}} = 11.5 \text{ MC}$ ; *c*:  $x = 0.30$ ,  $d_{\text{InGaAs}} = 16.3 \text{ MC}$ .

$\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$  представлено на рис. 2, *c*. Регистрируемая полоса ФЛ отвечает излучательной рекомбинации экситонов в КТ  $(\text{In,Ga})\text{As}$  [18]. При увеличении количества периодов наблюдается небольшое уменьшение полуширины полосы излучения и смещение ее максимума в высокоэнергетическую сторону на  $\sim 50 \text{ мэВ}$  (от  $\sim 1.14$  до  $\sim 1.19 \text{ эВ}$ ), что может быть обусловлено увеличением деформаций сжатия в КТ и (или) уменьшением в них концентрации индия.

Рост числа периодов сопровождается увеличением степени поляризации ФЛ  $P$ , при этом она не зависит от поляризации возбуждающего света. Это обусловлено тем, что при возбуждении с используемой энергией

кванта  $2.33 \text{ эВ}$ , значительно превышающей ширину запрещенной зоны  $\text{GaAs}$  ( $1.5 \text{ эВ}$ ), фотовозбужденные носители, термализуясь на квантово-размерные уровни КТ, теряют свою поляризационную память [24].

Из рис. 2 видно, что степень линейной поляризации излучения КТ  $(\text{In,Ga})\text{As}$  больше для направления  $[0\bar{1}1]$ , чем для  $[011]$ , что совпадает с характером анизотропии формы КТ (анизотропии деформаций). Для 2-периодной структуры степень линейной поляризации ФЛ  $P \approx 5\%$  и очень слабо изменяется во всем энергетическом интервале полосы излучения. Несколько иная ситуация имеет место для 11-периодной структуры. В максимуме полосы ФЛ  $P \approx 8\%$  и уве-



**Рис. 4.** Спектры фотолуминесценции (PL) 17-периодных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  для  $x = 0.40$  (a),  $x = 0.30$  (b, c) и номинальной толщины слоев  $\text{InGaAs}$  7.6 нм (a), 11.5 нм (b), 16.3 нм (c) при линейной поляризации излучения, параллельной  $[0\bar{1}1]$  ( $I_{[0\bar{1}1]}$ ) и  $[011]$  ( $I_{[011]}$ ) и соответствующие угловые распределения интенсивности излучения (d-f). (a-c): пунктирная кривая — степень линейной поляризации. (d-f): сплошная линия — аппроксимация  $I = I_{[0\bar{1}1]} \sin^2 \theta + I_{[011]} \cos^2 \theta$ .  $E_{\text{exc}} = 2.33$  эВ,  $T = 8$  К, плотность мощности  $0.1$  Вт/см<sup>2</sup>.

личивается с низкоэнергетической стороны полосы излучения. Поскольку АСМ-данные показывают повышение однородности размеров КТ с увеличением количества периодов, наблюдаемое спектральное изменение  $P$  мы приписываем большей анизотропии формы более крупных КТ в верхних слоях  $\text{InGaAs}$  структуры, определяющих низкоэнергетический край полосы ФЛ.

Примечательно, что во всех случаях наблюдаются различия интенсивности с поляризацией излучения вдоль направлений  $[0\bar{1}1]$  и  $[011]$ , в то время как для идеальной кубической структуры (симметрия  $T_d$ ) и тетрагональной структуры (симметрия  $D_{2d}$ ) эти направления эквивалентны. Незквивалентность направлений  $[0\bar{1}1]$  и  $[011]$  была недавно обнаружена при изучении тонкой структуры экситонного спектра сверхрешеток  $\text{GaAs}/\text{AlAs}$  в

экспериментах по оптически детектируемому магнитному резонансу [25] и угловых зависимостей линейной поляризации экситонного излучения сверхрешеток CdTe/Cd<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>Te [26]. Этот эффект может быть связан с некоторым понижением симметрии системы от идеальной  $D_{2D}$  до  $C_{2v}$ , в результате чего направления  $[0\bar{1}1]$  и  $[011]$  становятся неэквивалентными. В нашем случае такое понижение симметрии системы может быть обусловлено квазипериодическим анизотропным деформационным полем, вызванным анизотропным латеральным упорядочением КТ в многослойной структуре.

На рис. 2, *c* показана зависимость интенсивности полюсы ФЛ КТ (In,Ga)As от угла линейной поляризации ( $\theta$ ) относительно оси  $[011]$ . Эта зависимость хорошо аппроксимируется соотношением

$$I = I_{[0\bar{1}1]} \sin^2 \theta + I_{[011]} \cos^2 \theta. \quad (1)$$

Отношение  $I_{[0\bar{1}1]}$  к  $I_{[011]}$  равняется 1.13 и 1.20 для 2- и 11-периодных структур соответственно.

С целью детального изучения механизма самоорганизации цепочек КТ были выращены 17-периодные структуры при тех же условиях роста, что и структуры, обсуждавшиеся выше. Они имели одинаковую толщину разделяющего слоя GaAs (67 МС), а толщина слоя InGaAs и концентрация в нем индия варьировались (см. таблицу).

На рис. 3, *a* приведены АСМ-изображения и 2D фурье-преобразование для верхнего непокрытого слоя КТ (In,Ga)As 17-периодной структуры In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As(7.6 МС)/GaAs. Видно, что морфология поверхности образца являет собой массив периодических цепочек КТ. Из анализа АСМ-данных мы определили средний латеральный размер и высоту КТ ( $\sim 50$  и  $\sim 7$  нм соответственно). Наличие нескольких максимумов на картине 2D фурье-преобразования в направлении  $[011]$  указывает на существенную корреляцию ближнего порядка во взаимном расположении соседних КТ. При этом размытые максимумы в направлении  $[0\bar{1}1]$  соответствуют более слабому упорядочению только лишь в первом координационном окружении КТ. Среднее расстояние между цепочками в направлении  $[011]$  составляет  $\sim 110$  нм, а между центрами КТ в цепочке (в направлении  $[0\bar{1}1]$ )  $\sim 51$  нм (см. таблицу).

Интересным является эффект упорядочения КТ в цепочке (вдоль направления  $[0\bar{1}1]$ ), который обусловлен высокой плотностью КТ ( $w/d \approx 0.9$ , КТ практически соприкасаются) и минимизацией отталкивающих сил упругого взаимодействия соседних КТ. При этом некоторые сбои в предпочтительном расстоянии между ближайшими соседями обусловлены влиянием неоднородности деформационных полей в периферийных областях вдоль цепочек КТ.

Ситуация кардинально изменяется при уменьшении концентрации In до  $x = 0.30$  и увеличении номинальной толщины слоя In<sub>0.30</sub>Ga<sub>0.70</sub>As до 11.5 и 16.3 МС (рис. 3, *b, c*). В этом случае образуется пространственно однородный массив латерально-упорядоченных квантовых нитей. Средние значения высоты и ширины КН

составляют 7 и 77 нм соответственно, а латеральный период в направлении  $[011]$ , по данным фурье-анализа,  $\sim 100$  нм (см. таблицу).

Различия в морфологии поверхности, формирующейся при разных концентрациях индия и толщинах слоя In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, могут быть объяснены тем, что уменьшение концентрации индия приводит к уменьшению упругой энергии системы и соответственно к увеличению критической толщины морфологической неустойчивости поверхности, при которой реализуется морфологический переход 2D–3D (образуются 3D островки). При этом значительное различие подвижности (диффузии) адатомов между направлениями  $[0\bar{1}1]$  и  $[011]$  приводит к анизотропии массопереноса и соответственно анизотропии деформаций, которые и обуславливают анизотропный характер скорости зарождения как КТ так и КН.

Для КН (In,Ga)As реализуется значительно большая анизотропия формы КН в сравнении с КТ в цепочках, что приводит к увеличению степени поляризации в КН. На рис. 4 приведены спектры ФЛ (8 К) и угловое распределение линейной поляризации излучения многослойных структур, показанных на рис. 3. В спектре ФЛ цепочек КТ (рис. 4, *a*) регистрируется полоса излучения при  $\sim 1.28$  эВ (полуширина  $\Gamma \approx 65$  мэВ). Степень поляризации в максимуме полосы составляет 10%.

В случае двух разных образцов КН In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (рис. 4, *b, c*) полоса излучения регистрируется при  $\sim 1.29$  эВ ( $\Gamma \approx 34$  мэВ) и  $\sim 1.25$  эВ ( $\Gamma \approx 46$  мэВ), а степень поляризации в максимуме полосы составляет 14 и 30% соответственно. Низкоэнергетический сдвиг ( $\sim 40$  мэВ) максимума полосы ФЛ, наблюдаемый при увеличении толщины осаждаемого слоя In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As, обусловлен уменьшением величины упругих деформаций в КН (In,Ga)As. На энергетическое положение максимума полосы излучения могут влиять и некоторые другие факторы, такие как эффект сегрегации индия и присутствие пьезоэлектрического поля, обусловленного упругими деформациями. Эти эффекты не обсуждаются в данной работе.

Угловая зависимость интенсивности в максимуме полюсы линейно поляризованного излучения (рис. 4, *d-f*) хорошо аппроксимируется выражением (1) при отношении  $I_{[0\bar{1}1]}$  к  $I_{[011]}$ , равном 1.21, 1.32 и 1.65 для цепочек КТ (рис. 4, *a*) и квантовых нитей (рис. 4, *b, c*) соответственно.

## 4. Заключение

Таким образом, при определенных условиях роста может реализоваться упорядочение КТ в плоскости гетерограницы при осаждении уже первых периодов многослойной структуры (In,Ga)As/GaAs. При увеличении числа периодов структуры латеральное упорядочение и однородность размеров КТ и КН повышаются. Изменением толщины разделяющего слоя и концентрации индия можно обеспечить образование однородных

периодических цепочек КТ и КН. Процесс латерального упорядочения КТ и КН в многослойных структурах определяется конкуренцией эффектов анизотропии упругих свойств разделяющего слоя, анизотропии поверхностной диффузии адатомов и упругого взаимодействия КТ. Оптическая анизотропия излучения КТ и КН определяется эффектами анизотропии релаксации упругих деформаций и формой нанообъектов.

## Список литературы

- [1] J. Tersoff, C. Teichert, M.G. Lagally. Phys. Rev. Lett., **76**, 1675 (1996); Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen, N. Kobayashi. Phys. Rev. Lett., **75**, 2542 (1995).
- [2] V. Holy, G. Springholz, M. Pinczolits, G. Bauer. Phys. Rev. Lett., **83**, 356 (1999); S.S. Quek, G.R. Liu. Nanotechnology, **14**, 752 (2003).
- [3] X.-D. Wang, N. Liu, C.K. Shih, S. Govindaraju, A.L. Holmes. Appl. Phys. Lett., **85**, 1356 (2004).
- [4] G. Springholtz, V. Holy, M. Pinczolits, G. Bauer. Science, **282**, 734 (1998).
- [5] M. Meixner, E. Schöll, M. Schmidbauer, H. Raidt, R. Köhler. Phys. Rev. B, **64**, 245 307 (2001).
- [6] K. Zhang, Ch. Heyn, W. Hansen, Th. Schmidt, J. Falta. Appl. Phys. Lett., **76**, 2229 (2000).
- [7] G.E. Cirlin, G.M. Guryanov, A.O. Golubok, S.Ya. Tapissev, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, M. Grundmann, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **67**, 97 (1995).
- [8] G.E. Cirlin, V.N. Petrov, A.O. Golubok, S.Ya. Tapissev, V.G. Dubrovskii, G.M. Guryanov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Surf. Sci., **377–379**, 895 (1997).
- [9] Zh.M. Wang, K. Holmes, Yu.I. Mazur, G.J. Salamo. Appl. Phys. Lett., **84**, 1931 (2004).
- [10] T. Mano, R. Nötzel, G.J. Hamhuis, T.J. Eijkemans, J.H. Wolter. J. Appl. Phys., **85**, 109 (2004).
- [11] H. Saito, K. Nishi, S. Sugou, Y. Sugimoto. Appl. Phys. Lett., **71**, 590 (1997).
- [12] A. Moritz, R. Wirth, A. Hangleiter, A. Kurtenbach, K. Eberl. Appl. Phys. Lett., **69**, 212 (1996).
- [13] Y. Tang, D.H. Rich, I. Mukhametzhano, P. Chen, A. Madhukar. J. Appl. Phys., **84**, 3342 (1998).
- [14] S. Noda, T. Abe, M. Tamura. Phys. Rev. B, **58**, 7181 (1998).
- [15] P. Yu, W. Langbein, K. Leosson, J.M. Hvam, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, A.F. Tsatsul'nikov, Yu.G. Musikhin. Phys. Rev. B, **60**, 16 680 (1999).
- [16] V. Zwiller, L. Jarlskog, M.-E. Pistol, C. Pryor, P. Castrillo, W. Seifert, L. Samuelson. Phys. Rev. B, **63**, 233 301 (2000).
- [17] M. Henini, S. Sanguinetti, S.C. Fortina, E. Grilli, M. Guzzi, G. Panzarini, L.C. Andreani, M.D. Upward, P. Moriarty, P.H. Beton, L. Eaves. Phys. Rev. B, **57**, R6815 (1998).
- [18] Yu.I. Mazur, W.Q. Ma, X. Wang, Zh.M. Wang, G.J. Salamo, M. Xiao, T.D. Mishima, M.B. Johnson. Appl. Phys. Lett., **83**, 987 (2003).
- [19] Y. Hasegawa, H. Kiyama, Q.K. Xue, T. Sakurai. Appl. Phys. Lett., **72**, 2265 (1998).
- [20] M. Schmidbauer, Th. Wiebach, H. Raidt, M. Hanke, R. Köhler, H. Wawra. Phys. Rev. B, **58**, 10 523 (1998).
- [21] V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg. Phys. Rev. Lett., **75**, 2968 (1995).

- [22] E. Penev, P. Kratzer, M. Scheffler. Phys. Rev. B, **64**, 85 401 (2001).
- [23] C. Priester. Phys. Rev. B, **63**, 153 303 (2001).
- [24] M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi, S. Sogou, T. Okuno, Y. Matsumoto. Phys. Rev. B, **59**, R5300 (1999).
- [25] H.W. van Kesteren, E.C. Cosman, W.A.J.A. van der Poel, C.T. Foxon. Phys. Rev. B, **41**, 5283 (1990).
- [26] И.Г. Аксянов, А.В. Кудинов, Ю.Г. Курсаев, Б.П. Захарченя, T. Wojtowicz, G. Karczewski, J. Kossut. ФТТ, **44**, 903 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

## Lateral ordering of quantum dots and quantum wires in (In,Ga)As/GaAs (100) multilayer structures

V.V. Strelchuk, P.M. Lytvyn, A.F. Kolomys, M.Ya. Valakh, Yu.I. Masur<sup>+</sup>, Zh. M. Wang<sup>+</sup>, G.J. Salamo<sup>+</sup>

Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

<sup>+</sup> University of Arkansas,  
Department of Physics,  
Fayetteville, Arkansas, 72701

**Abstract** The surface morphology and optical properties of the multilayer (In,Ga)As/GaAs (100) structures with selfassembled quantum dots and quantum wires grown by molecular-beam epitaxy are investigated. It is found that the lateral ordering of quantum dots arise from early periods of the multilayer structure. With the increase of periods number, the alignment of quantum dots in rows along the  $[0\bar{1}1]$  direction is observed. The improvement of lateral ordering of the examined structures correlates well with the increase of the optical anisotropy of radiation, caused by the anisotropy of the relaxation of elastic deformations and by the shape of nanostructures. The possible mechanism of the lateral ordering of quantum dots and wires in multilayer structures is discussed, including effects of the anisotropy of the deformation fields and the adatoms diffusion, as well as the elastic interaction of neighboring quantum dots.