

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПСЕВДОМОРФНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК {InGaAs/GaAs} НА ПОДЛОЖКАХ GaAs (100), (110) И (111)А

© 2023 г. Е. А. Климов^{1, 2}, С. С. Пушкарёв^{1, *}, А. Н. Клочков³, М. О. Можаяева²

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
имени В.Г. Мокерова РАН, Нагорный проезд, 7, стр. 5, Москва, 117105 Россия

²Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество “НПО “Орион”,
ул. Косинская, 9, Москва, 111538 Россия

³Научно-исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.12.2022 г.

Сообщается о получении сверхрешеток с псевдоморфно напряженными квантовыми ямами {In_xGa_{1-x}As/GaAs}, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (100), (110) и (111)А. Качество кристаллической структуры эпитаксиальных образцов оценивается с помощью атомно-силовой микроскопии их поверхности. Сообщается о проявлении пьезоэлектрического поля в спектрах фотолюминесценции.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, поперечно-полосатый рельеф, молекулярно-лучевая эпитаксия, GaAs, InGaAs, (110), (111)А, псевдоморфная квантовая яма, пьезоэлектрический эффект, спектроскопия фотолюминесценции

DOI: 10.31857/S054412692370031X, EDN: UDRWAA

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводники GaAs и InGaAs имеют структуру цинковой обманки и нецентросимметричны. Им присущ пьезоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении электрической поляризации у деформированных слоев. Поскольку параметр решетки In_xGa_{1-x}As больше, чем GaAs, эпитаксиально выращенные слои In_xGa_{1-x}As на подложке GaAs оказываются упруго напряженными (если толщина слоя не превышает критическое значение, при котором начинается релаксация через образование дислокаций). В упруго напряженных слоях In_xGa_{1-x}As на подложке GaAs со стандартной ориентацией (100) пьезоэффект не возникает из-за симметрии тензора пьезоэлектрических модулей, в то время как выращенный на подложках GaAs с любыми другими ориентациями слой In_xGa_{1-x}As становится электрически поляризованным. Амплитуда вектора поляризации в пленке In_xGa_{1-x}As зависит от рассогласования параметров решетки, т.е. от молярной доли индия x . Направление поляризации зависит от ориентации подложки: для подложек типа (111) вектор поляризации направлен перпендикулярно плос-

кости роста, для подложек (110) — в плоскости роста, для прочих подложек — под некоторым углом к поверхности. На границе упруго напряженного слоя In_xGa_{1-x}As и ненапряженного слоя GaAs происходит скачок вектора поляризации, приводящий к формированию поверхностного заряда, который является источником встроенного электрического поля. Но если поперечное поле возникает за счет пьезоэффекта без дополнительных условий, то для возникновения латерального поля необходимо наличие гетерограниц, перпендикулярных плоскости роста. В идеальной квантовой яме In_xGa_{1-x}As с продольным вектором поляризации не возникает электрического поля в плоскости роста; для его появления требуются неидеальности либо в виде ступеней на гетерограницах In_xGa_{1-x}As/GaAs, либо в виде трехмерных островков [1].

Амплитуда электрических полей в таких структурах была оценена в работе [2]: в гетероструктурах InGaAs/GaAs с молярной долей индия $x \sim 0.2$ пьезоэлектрический заряд, формирующийся на гетерограницах InGaAs/GaAs, может создавать электрические поля порядка 10^5 В/см. Мотивацией к данному исследованию является попытка ис-

Таблица 1. Параметры эпитаксиального роста гетероструктур (T_g – температура роста, γ – отношение давления As_4 к давлению Ga)

№ образца	Мольная доля индия в КЯ (x)	Ориентация подложки	T_g , °C			Скорость роста, Å/мин	γ
			буфера	КЯ	барьера		
105	0.1	(100)	590	480	590	120	33
103		(110)	480	430	480	90	38
104		(111)A	480	430	480	90	39
106	0.2	(100)	590	480	590	120	37
102		(110)	480	430	480	90	38
102		(111)A	480	430	480	90	38

пользования этих электрических полей для усиления генерации терагерцевых электромагнитных волн полупроводниковыми гетероструктурами и фотопроводящими антеннами под действием фемтосекундной накачки. Так, амплитуда встроенных электрических полей сравнима с полем в зоне терагерцевой фотопроводящей антенны.

При взаимодействии фемтосекундных оптических лазерных импульсов с поверхностью полупроводников происходит генерация терагерцевых электромагнитных волн с широким частотным спектром (от субТГц до нескольких ТГц) [3]. Роль встроенного электрического поля в протекающих при этом процессах фотовозбуждения, релаксации и рекомбинации неравновесных носителей нуждается в исследовании, поскольку наличие такого поля может повлиять на величину и направление неравновесного переходного фототока и, следовательно, увеличивать терагерцевый отклик полупроводника. В частности, ранее нами было показано, что полупроводниковые сверхрешеточные структуры $\{i\text{-LTG-GaAs/GaAs:Si}\}$, выращенные на подложках GaAs (111)A, генерируют более интенсивные импульсы ТГц-излучения, чем такие же структуры на стандартных подложках GaAs (100) [4, 5]. Аналогичный эффект наблюдался нами в пленках $i\text{-LTG-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенных на подложках InP (100) и (411) [6]. Здесь LTG – low-temperature-grown – обозначение пленок, выращенных при пониженной температуре относительно стандартной температуры эпитаксиального роста данного материала; пониженная температура роста лежит в диапазоне 160–350°C.

Известно, что электрическое поле, перпендикулярное плоскости полупроводниковой квантовой ямы (КЯ), приводит к уменьшению энергии перехода между уровнями размерного квантования электронов и дырок вследствие квантово-размерного эффекта Штарка. Это обстоятельство может привести к сдвигу пика от КЯ на спектре фотолюминесценции в красную сторону, который неоднократно

наблюдался, например, в работах [7–9]. Таким образом, в данной работе анализируется положение оптических линий в спектрах фотолюминесценции гетероструктур InGaAs/GaAs, выращенных на подложках (100), (110) и (111)A, с целью обнаружения в них пьезоэлектрического поля.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые образцы были выращены на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) ЦНА-24 на полуизолирующих подложках GaAs с кристаллографическими ориентациями поверхностей (110), (111)A и (100). Перед каждым процессом в камере роста проводилась предростовая подготовка подложек в потоке As_4 при температуре 620°C. После этого выращивался нелегированный буферный слой GaAs толщиной 200 нм и 10-периодная сверхрешетка $\{In_xGa_{1-x}As/GaAs\}$ общей толщиной 1100 нм с мольной долей индия $x = 0.1$ и 0.2. Толщина слоев InGaAs выбрана такой, чтобы она не превосходила критической толщины решеточно-рассогласованного слоя данного состава, благодаря чему упругие напряжения в слое не релаксируют и слой остается псевдоморфным, аналогично квантовой яме в р-НЕМТ [10]. Значение температуры роста T_g измерялось и контролировалось с помощью термопары, вмонтированной в держатель образца, а значения парциальных давлений P_{As_4} , P_{Ga} и P_{In} – с помощью датчика Альперта–Байярда в зоне роста. Конкретные значения γ – отношения потоков элементов V группы (As) и III группы (Ga), также приведенные в табл. 1, были выбраны нами эмпирически, исходя из усредненных значений γ , оптимальных для роста на подложках с данной ориентацией. Дизайн образцов показан на рис. 1, параметры роста образцов указаны в табл. 1.

Исследование морфологии поверхности образцов выполнялось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе NT-MTD Ntegra

10 периодов	i -GaAs (барьер)	84 нм
	i -GaAs (пристенки)	1 нм
	i -In _{0.1} Ga _{0.9} As (КЯ)	25 нм
i -GaAs (буфер)		200 нм
GaAs (подложка)		

10 периодов	i -GaAs (барьер)	99 нм
	i -GaAs (пристенки)	1 нм
	i -In _{0.2} Ga _{0.8} As (КЯ)	10 нм
i -GaAs (буфер)		200 нм
GaAs (подложка)		

Рис. 1. Дизайн гетероструктур.

Maximus в контактном режиме, сканировались площади размером 5×5 , 10×10 и 30×30 мкм.

Измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) выполнялись в оптическом криостате при температуре 77 К. Для возбуждения ФЛ использовалось излучение твердотельного лазера с длиной волны 532 нм, сфокусированное на поверхности образца в пятно размером ~ 150 мкм и плотностью мощности ~ 1900 Вт/см². Сигнал ФЛ в области 1.2–2.0 эВ детектировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-62, охлаждаемый жидким азотом, а в области 0.6–1.2 эВ — неохлаждаемым InGaAs pin-фотодиодом Hamamatsu с использованием техники синхронного детектирования.

3. МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Морфология поверхности выращенных сверхрешеток, исследованная с помощью АСМ, свидетельствует о релаксации упругих напряжений в In_xGa_{1-x}As слоях посредством образования равномерной сетки однородно распределенных дислокаций. Такая релаксация, которую можно назвать “регулируемой”, происходит, например, в метаморфном буфере. Она вызывает образование характерного поперечно-полосатого рельефа поверхности, когда в двух взаимно перпендикулярных направлениях расположены прямолинейные чередующиеся впадины и гребни (“cross-hatch” в англоязычной литературе) [11, 12]. Такая релаксация упругих напряжений сохраняет монокристалличность и относительную гладкость поверхности эпитаксиальных слоев и обеспечивается оптималь-

ным режимом эпитаксиального роста. Если же условия МЛЭ роста не являются оптимальными, то происходит нерегулируемая релаксация, при которой на поверхности развивается изотропный хаотичный рельеф с гораздо большими неровностями.

Значения среднеквадратичной шероховатости R_q поверхности выращенных сверхрешеток представлены в табл. 2. Наиболее гладкими поверхностями обладают образцы на стандартных подложках GaAs (100), при этом увеличение мольной доли In в квантовых ямах (а значит, и возрастание рассогласования по параметру решетки с подложкой) приводит к некоторому увеличению R_q . На поверхностях этих образцов виден поперечно-полосатый рельеф с преобладанием одного из направлений, как видно из рис. 2а, 2б.

Также черты поперечно-полосатого рельефа выявлены на поверхности остальных образцов с мольной долей индия $x = 0.2$. Образец на подложке GaAs (110) демонстрирует очень отчетливые гребни в одном из направлений (рис. 2в), в то время как поверхность образца на подложке (111)А состоит из мелких вытянутых зерен размерами 0.2×0.4 мкм, одинаково ориентированных и выстроившихся в прямолинейные ряды (рис. 2г).

Рельеф поверхности остальных образцов с мольной долей индия $x = 0.1$ выглядит хаотичным и изотропным. Поверхность образца на подложке GaAs (110) покрыта углублениями и бугорками, а поверхность образца на подложке GaAs (111)А — высокими отдельными островками угловатой формы (не показаны на рис. 2). Поверхности этих об-

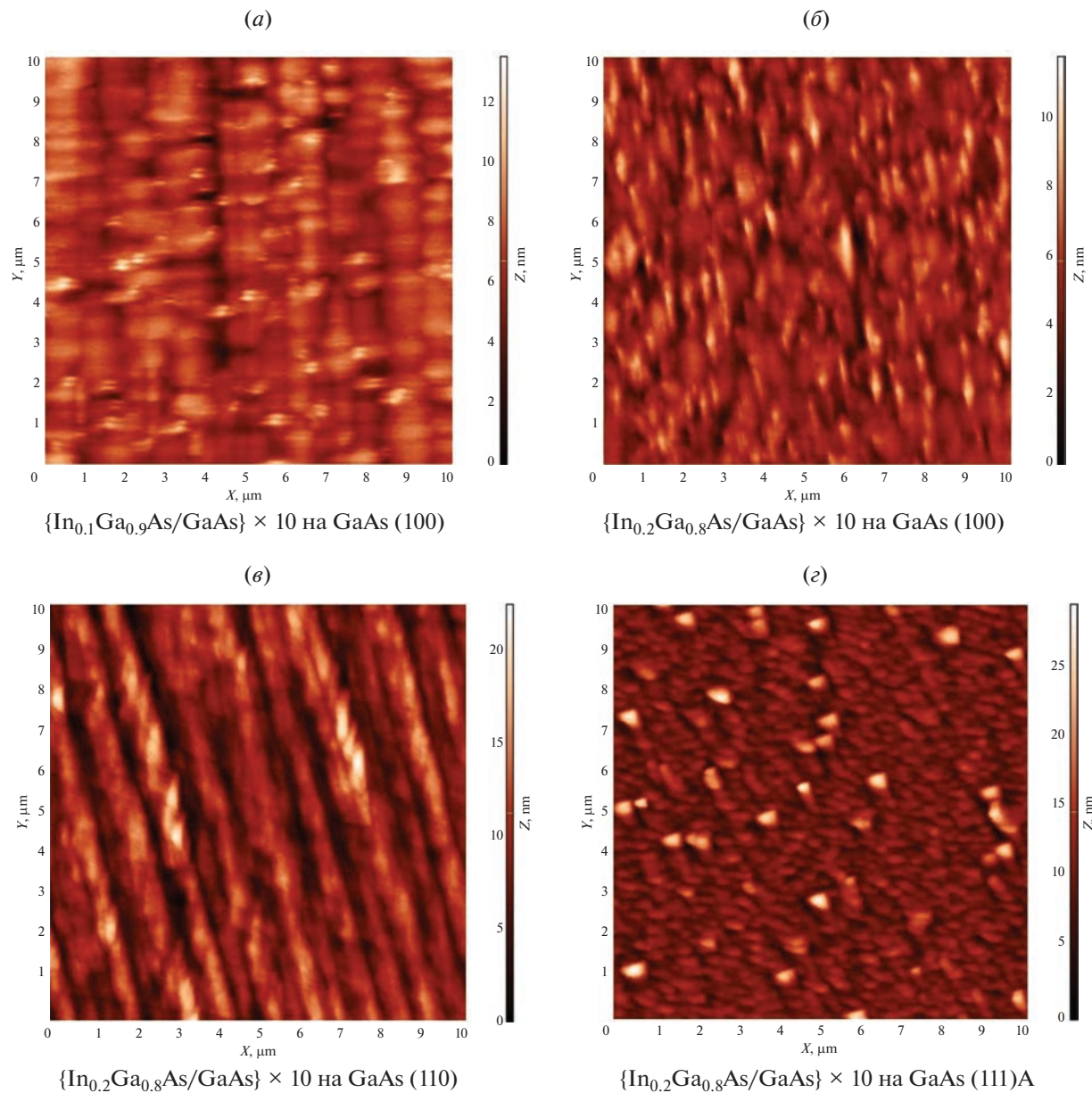


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности исследуемых гетероструктур, размер скана 10 × 10 мкм.

Таблица 2. Параметры морфологии поверхности выращенных сверхрешеток (тип рельефа и среднеквадратичная шероховатость R_q , измеренная по областям различной площади)

№ образца	x	Ориентация подложки	Рельеф поверхности	R_q , нм		
				5 × 5 мкм	10 × 10 мкм	30 × 30 мкм
105	0.1	(100)	Поперечно-полосатый	1.2	1.3	1.5
103		(110)	Хаотичный, однородно распределенные бугорки и углубления 0.4 × 0.5 мкм	10.5	12.2	13.7
104		(111)A	Хаотичный, отдельные высокие островки 0.5 × 1.0 мкм	20.9	21.1	25.8
106	0.2	(100)	Поперечно-полосатый	1.4	1.2	1.9
102		(110)	Параллельные прямолинейные гребни	3.1	3.2	3.4
102		(111)A	Анизотропный, ориентированные удлиненные зерна 0.2 × 0.4 мкм	2.8	3.0	8.2

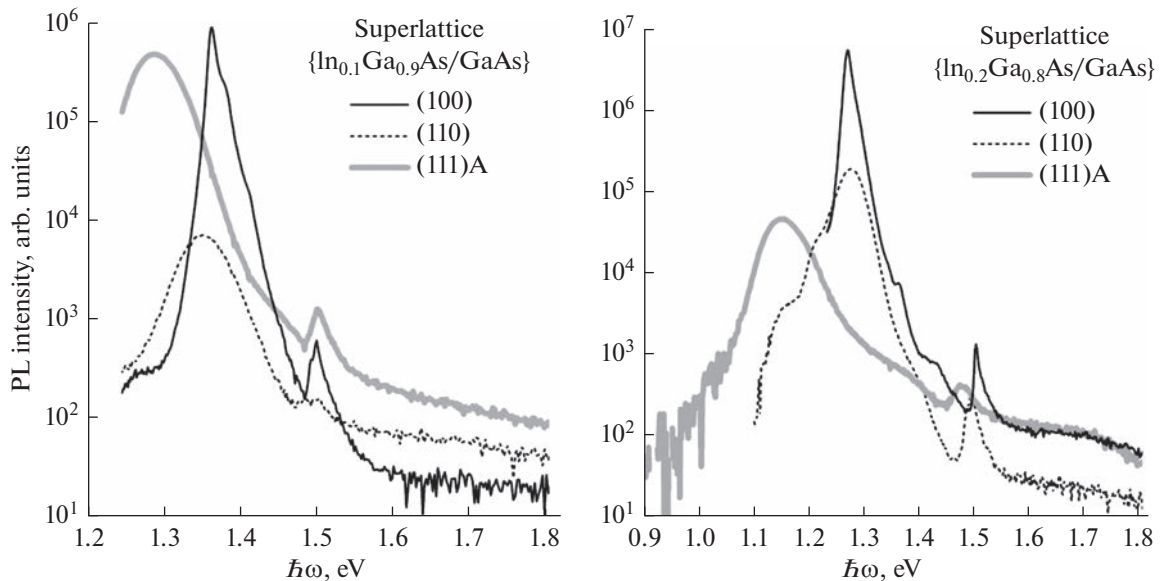


Рис. 3. Спектры ФЛ исследуемых гетероструктур, измеренные при температуре 77 К.

разцов самые шероховатые во всей серии исследованных образцов.

Несмотря на то, что толщина каждого отдельного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ была меньше критической для данного состава, упругие напряжения, тем не менее, релаксировали (судя по рельефу поверхностей гетероструктур). Причина заключается в большом числе псевдоморфных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в каждой гетероструктуре, а также в том, что они отделены друг от друга достаточно тонкими слоями GaAs. В результате суммарная упругая энергия слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, заключенная в единице объема сверхрешетки, превысила некоторое пороговое значение, и произошла релаксация (возможно, частичная).

4. СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Спектры ФЛ исследуемых сверхрешеток показаны на рис. 3. На спектрах ФЛ всех образцов наблюдаются два пика. Слабый пик с максимумом вблизи 1.50 эВ соответствует слоям GaAs. Второй, более интенсивный пик соответствует оптическим межзонным переходам в КЯ InGaAs/GaAs . Его положение зависит от содержания индия x в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, а также от ориентации подложки. Видно, что выращенная на подложке (111)А сверхрешетка демонстрирует пик, сдвинутый в сторону меньших энергий по сравнению со сверхрешеткой на стандартной подложке (100), в то время как пик сверхрешетки на подложке (110) либо мало смещен ($x = 0.1$), либо вовсе не смещен ($x = 0.2$) по энергии относительно пика сверхрешетки на подложке (100). Замеченная закономерность может свидетельствовать о существовании встроенного поперечного поля в сверхрешетках на

подложках (111)А. Однако сдвиг пика ФЛ также мог быть вызван неодинаковым реальным содержанием индия в КЯ из-за различного поведения атомов In на поверхностях (100), (110) и (111)А.

Дополнительное подтверждение того, что причиной красного смещения пика ФЛ является встроенное поперечное пьезоэлектрическое поле, заключается в изменении положения пика в зависимости от мощности лазерного излучения, возбуждающего ФЛ. Пик сверхрешетки на (110) не меняет своего положения при уменьшении мощности фотовозбуждения, а пик сверхрешетки на (111)А смещается в сторону меньших энергий, как видно из рис. 4. Данное наблюдение объясняется тем, что электрическое поле экранируется фотовозбужденными носителями заряда, и при их малой концентрации красное смещение пика сверхрешетки, вызванное квантово-размерным эффектом Штарка в случае поперечного поля, проявляется сильнее, чем при большой концентрации [7, 8] (заметим, что пик от слоев GaAs при 1.50 эВ при этом не смещается, поскольку слои GaAs не напряжены и в них не образуется пьезоэлектрическое поле). В случае же латерального поля квантово-размерного эффекта Штарка нет, поэтому экранирование латерального поля не отражается на энергии электронных переходов в сверхрешетке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены 10-периодные сверхрешетки с псевдоморфными квантовыми ямами $\{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}\}$ с мольной долей индия $x = 0.1$ и 0.2 , каждая из них —

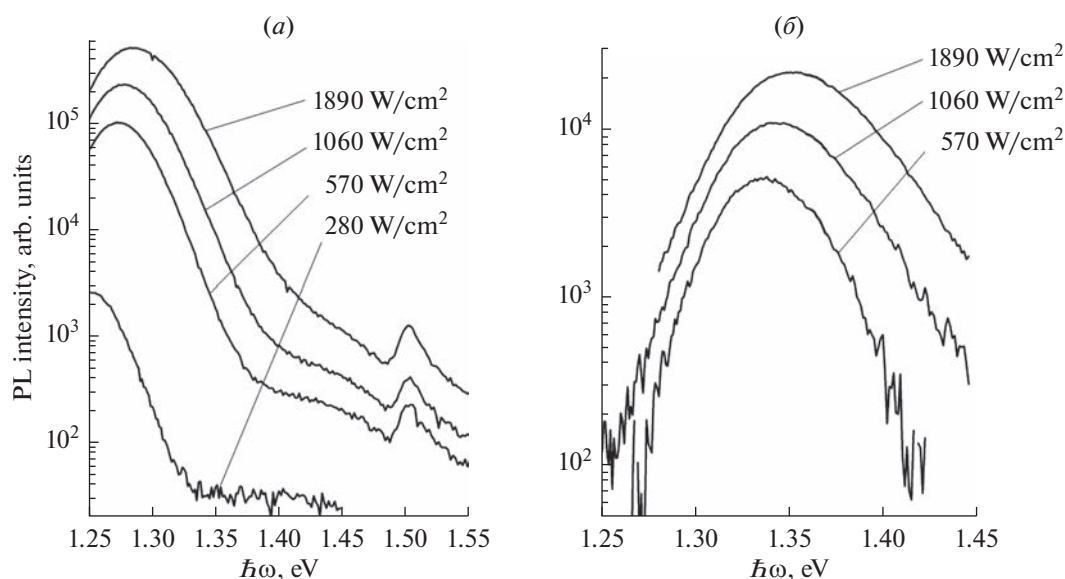


Рис. 4. Смещение пика ФЛ от гетероструктур, выращенных на подложках GaAs (111)A, в зависимости от плотности мощности лазерного возбуждения: *a* – $\{\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}\} \times 10$; *б* – $\{\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}\} \times 10$.

на подложках GaAs (100), (110) и (111)A. На поверхности сверхрешеток с помощью АСМ наблюдается поперечно-полосатый рельеф либо его отдельные черты, что свидетельствует о регулируемой релаксации упругих напряжений в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ слоях. Такая релаксация происходит посредством образования равномерной сетки однородно распределенных дислокаций и обеспечивается оптимально выбранным режимом эпитаксиального роста. В квантовых ямах сверхрешеток на подложках GaAs (111)A образовалось встроенное пьезоэлектрическое поле, направленное перпендикулярно плоскости слоев, которое проявилось в форме красного смещения пика на спектре ФЛ по сравнению со спектрами ФЛ сверхрешеток на стандартных подложках (100), причем это смещение увеличивается при уменьшении мощности фотовозбуждения. Пик на спектрах ФЛ от сверхрешеток на подложках GaAs (110) по сравнению со спектрами ФЛ сверхрешеток на стандартных подложках (100) не сдвинут, а также не смещается при изменении мощности фотовозбуждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00656, <https://rscf.ru/project/22-19-00656/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ilg M., Ploog K.H., Trampert A.* Lateral piezoelectric fields in strained semiconductor heterostructures // *Physical Review B*. 1994. V. 50. I. 23. P. 17111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.17111>
2. *Smith D.L., Mailhot C.* Theory of semiconductor superlattice electronic structure // *Reviews of Modern Physics*. 1990. V. 62. № 1. P. 173–234. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.62.173>
3. *Takeuchi H., Yanagisawa J., Hasegawa T., Nakayama M.* Enhancement of terahertz electromagnetic wave emission from an undoped GaAs/n-type GaAs epitaxial layer structure // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. P. 081916. <https://doi.org/10.1063/1.2976436>
4. *Галиев Г.Б., Пушкарёв С.С., Буряков А.М., Билык В.Р., Мишина Е.Д., Климов Е.А., Васильевский И.С., Мальцев П.П.* Генерация и детектирование терагерцового излучения в низкотемпературных эпитаксиальных пленках GaAs на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. Вып. 4. С. 529–534. <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.04.44347.8408>
5. *Буряков А.М., Билык В.Р., Мишина Е.Д., Галиев Г.Б., Климов Е.А., Мальцев П.П., Пушкарёв С.С.* Генерация терагерцового излучения низкотемпературными мультислойными эпитаксиальными пленками *i*-LT-GaAs/n-GaAs на подложках GaAs с ориентациями (100) и (111)A // *Нано- и микросистемная техника*. 2017. Т. 19. № 2. С. 77–84. <https://doi.org/10.17587/nmst.19.77-84>
6. *Галиев Г.Б., Грехов М.М., Китаева Г.Х., Климов Е.А., Ключков А.Н., Коленцова О.С., Корниенко В.В., Кузнецов К.А., Мальцев П.П., Пушкарёв С.С.* Генерация терагерцового излучения в низкотемпературных эпитаксиальных пленках InGaAs на подложках InP с ориентациями (100) и (411)A // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. Вып. 3. С. 322–330. <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.03.44201.8312>
7. *Vaccaro P.O., Takahashi M., Fujita K., Watanabe T.* Growth by molecular beam epitaxy and photoluminescence of InGaAs/GaAs quantum wells on GaAs (111)A

- substrates // *Journal of Applied Physics*. 1994. V. 76. P. 8037–8041.
<https://doi.org/10.1063/1.357923>
8. *Khoo E.A., David J.P.R., Woodhead J., Grey R., Rees G.* Photoluminescence linewidths of piezoelectric quantum wells // *Applied Physics Letters*. 1999. V. 75. P. 1929–1931.
<https://doi.org/10.1063/1.124874>
9. *Chin A., Lee K.* High quality Al(Ga)As/GaAs/Al(Ga)As quantum wells grown on (111)A GaAs substrates // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 68. P. 3437–3439.
<https://doi.org/10.1063/1.115785>
10. *Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Моке-ров В.Г., Черечукин А.А.* Влияние температуры роста спейсерного слоя на подвижность двумерного электронного газа в РНЕМТ-структурах // *ФТП*. 2006. Вып. 12. С. 1479–1483.
11. *Romanato F., Napolitani E., Carnera A., Drigo A.V., Lazzarini L., Salviati G., Ferrari C., Bosacchi A., Franchi S.* Strain relaxation in graded composition $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ buffer layers // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 86. P. 4748–4755.
<https://doi.org/10.1063/1.371439>
12. *Choi H., Jeong Y., Cho J., Jeon M.H.* Effectiveness of non-linear graded buffers for In(Ga,Al)As metamorphic layers grown on GaAs (001) // *J. Cryst. Growth*. 2009. V. 311. P. 1091–1095.
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.10.116>