

Поляризация фотолюминесценции вдоль плоскости квантово-размерных слоев структур InAs / Ga(In)As, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии

© В.Я. Алешкин*, Б.Н. Звонков, И.Г. Малкина, Ю.Н. Сафьянов, Д.О. Филатов⁺, А.Л. Чернов

Научно-исследовательский физико-технический институт,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603600 Нижний Новгород, Россия

⁺ Региональный центр сканирующей зондовой микроскопии
при Научно-исследовательском физико-техническом институте,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Получена 27 января 1998 г. Принята к печати 14 апреля 1998 г.)

Исследована линейная поляризация фотолюминесценции вдоль плоскости структур InAs / Ga(In)As. Обнаружено, что она зависит от несимметричности профиля квантовой ямы, возникновения квантовых точек, наличия включений в твердых растворах.

Современные методы исследования поверхности, такие как атомно-силовая и туннельная микроскопия, сильно продвинули изучение сложных механизмов роста квантово-размерных слоев (КРС) и их структуры. Однако многие особенности КРС, являющиеся следствием происходящих при эпитаксии процессов, не поддаются изучению этими методами. Такие процессы как сегрегация примесей, приводящая к изменению потенциального профиля КРС, или расслоение твердого раствора развиваются в толще структуры при наращивании следующего, покровного, слоя. Таким образом, поскольку окончательное формирование структуры происходит при наращивании ее покровным слоем, важно развивать методики исследования, позволяющие изучать структуру КРС под толщей других эпитаксиальных слоев. При этом одним из наиболее важных методов может оказаться анализ оптической анизотропии, очень чувствительной к структуре кристалла. Среди многочисленных публикаций, касающихся оптической анизотропии структур $A^{III}B^V$ с КРС имеется относительно мало работ, посвященных поляризации фотолюминесценции (ФЛ) квантовых ям (КЯ) [1–5] и квантовых точек (КТ) [5], исходящей вдоль плоскости слоев эпитаксиальной структуры — торцевой ФЛ. Однако именно в этом направлении, перпендикулярно оптической оси, влияние квантового ограничения и механических напряжений в квантовом слое на оптическую анизотропию должно проявляться наиболее сильно.

Известно, что КЯ в тетрагонально деформированном слое InGaAs на подложках GaAs или InP содержит только уровни тяжелых дырок [6,7], и направление вектора электрического поля E излучения ФЛ КЯ должно лежать в плоскости КЯ. При этом, если бы имела ось симметрии не ниже 3-го порядка, направленная по нормали к слоям структуры, то замешивание состояний тяжелых и легких дырок отсутствовало бы, и краевая ФЛ

была бы на 100% линейно поляризована [8,9]. Вследствие наличия гетерограниц, гетерослой $A^{III}B^V$ имеют более низкую симметрию: направления [110] и $[-110]$ не эквивалентны. Кроме того, возможно дополнительное понижение симметрии атомных связей на гетерогранице за счет возникновения различных морфологических особенностей во время эпитаксиального роста. Поэтому на гетерогранице возможно замешивание состояний тяжелых и легких дырок [10]. В этом случае из теории групп следует также, что в КЯ с симметричным потенциальным профилем должна наблюдаться 100%-ная поляризация (если параметр замешивания [10] не слишком велик), однако отклонение потенциального профиля КЯ от прямоугольной формы должно оказывать влияние на степень поляризации.

В данной работе исследована анизотропия ФЛ структур с КРС, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении: наблюдалась связь между структурой КРС и линейной поляризацией ФЛ со сколотых граней структур In(Ga)As / GaAs и InAs / GaInAs / InP с напряженными КЯ и КТ. Насколько нам известно, торцевая ФЛ КРС In(Ga)As на подложках GaAs и InAs / InGaAs на подложках InP никогда ранее не исследовалась.

Экспериментальные методики

Рост проводили в атмосфере водорода из триметилгаллия (ТМГ), триметилиндия (ТМИ), служивших источниками элементов III группы, при избытке источника V группы — арсина или фосфина.

Квантово-размерные слои InAs (InGaAs) выращивали на подложках (001) GaAs. Образцы содержали одиночный КРС, покрытый GaAs, или многослойную периодическую структуру (МПС). МПС представляли

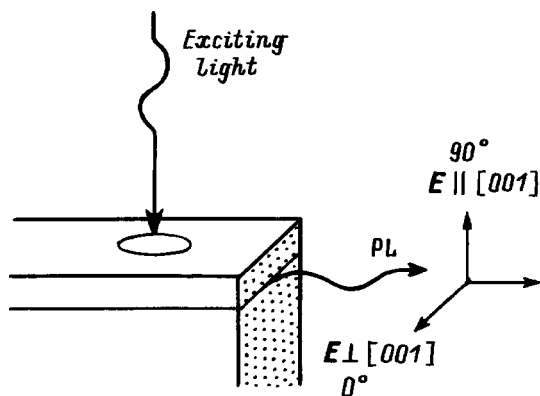


Рис. 1. Схема измерений фотолюминесценции (PL) вдоль слоев структур.

собой $10 \div 20$ КРС, разделенных барьерами GaAs толщиной 0.1 мкм. КЯ выращивали при 650°C . Они имели не более 20% InAs и толщину меньше критической толщины спонтанного образования КТ [11]. КТ выращивали по механизму Странски–Крастанова при 630°C с последующей остановкой роста. Рост и свойства этих КТ подробно описаны в [12,13]. КТ содержали от 2 до 5 монослоев (МС) InAs. Исследование в атомно-силовом микроскопе ТМХ2100 поверхности контрольных образцов InAs/GaAs (выращенных без покровного слоя GaAs) выявило наличие холмиков с характерным размером $10 \div 20$ нм и плотностью $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [14].

Многослойные периодические структуры с КЯ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{InP}$ были выращены на подложках (001) InP при 600°C . Состав твердого раствора определяли методом рентгеновской дифракции. Слои $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ были близки по параметру решетки к подложке (несоответствие параметров решетки менее $\pm 5 \cdot 10^{-3}$). В середине слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ на одинаковом расстоянии от InP помещали напряженный слой InAs с номинальной толщиной $2.5 \div 7.5$ МС ($0.8 \div 2.4$ нм).

Рис. 1 поясняет схему проведения измерений. Возбуждающий ФЛ луч He–Ne-лазера (длина волны 633 нм) фокусировали на поверхности структуры вблизи скола в пятно диаметром 0.1 мм. Излучение из образца (его ФЛ) фокусировали собирающей линзой на щели монохроматора и регистрировали с помощью автоматизированной системы. Поляризатор помещали перед щелью монохроматора и поворачивали вокруг направления наблюдения. Направление вектора электрического поля ФЛ образца (вектора E), перпендикулярное нормали к плоскости слоев структуры (т.е. вдоль слоев), характеризовали углом 0° . Если этот вектор был направлен вдоль нормали к слоям, то такому направлению в наших обозначениях соответствовал угол 90° .

Степень поляризации оценивали по формуле $P = 100\% \cdot (I_0 - I_{90}) / (I_0 + I_{90})$ (I_0, I_{90} — интенсивности, соответствующие 0° и 90°). Погрешность ее определения составляла приблизительно $\pm 10\%$.

Результаты и их обсуждение

ФЛ всех изученных образцов, наблюдаемая вдоль направления нормали к поверхности, не была заметно поляризована: P составляла менее 10% . Торцевая ФЛ калибровочных образцов, представлявших собой однородные эпитаксиальные гомоэпитаксиальные слои GaAs или InP или структуры GaAs с периодически расположенными δ -слоями акцепторного углерода, также не имела заметной поляризации.

Слабой была и зависимость поляризации от геометрических параметров образца: удаленности возбужденного пятна от скола, толщины подложки и качества поверхности образцов, но все-таки для уменьшения возможной ошибки вследствие воздействия перечисленных факторов, между собой сравнивались результаты измерений, проведенных в одинаковых условиях.

Торцевая ФЛ всех изученных гетероструктур была линейно поляризована, причем направлениями максимальной и минимальной интенсивности ФЛ относительно слоев структуры всегда оставались 0° и 90° .

1. Одиночные КРС

Одиночный КРС In(Ga)As на подложке GaAs или InP отличается более слабым волноводным эффектом, чем МПС, в которой основная доля излучения распространяется в ее объеме. Если толщина покровного слоя становится меньше длины волны ФЛ в веществе (в нашем случае ~ 0.3 мкм), то большая доля излучения вдоль КРС распространяется в покровном слое. Вблизи поверхности имеется поле поверхностных состояний, что, с одной стороны, может приводить к повороту плоскости поляризации за счет электрооптического эффекта, а с другой — к нарушению правил отбора по поляризации из-за отклонения потенциального профиля квантовой ямы от прямоугольной формы в электрическом поле поверхностных состояний.

Действительно, экспериментально было обнаружено, что толщина покровного слоя является наиболее существенным фактором, который следует учитывать при определении величины линейной поляризации торцевой ФЛ одиночного КРС. Зависимость линейной поляризации от толщины покровного КРС измеряли на изготовленных химическим травлением малоугловых сечениях структур GaAs/In(Ga)As/GaAs и InP/InAs/InP. Возбуждающий луч перемещали вдоль клина сечения параллельно излучающему торцу.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности (I_{PL}) торцевой ФЛ структуры GaAs/In(Ga)As/GaAs ($n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) от толщины покровного слоя GaAs. Если КРС находился в квазинейтральной области (т.е. вне пределов области пространственного заряда поверхностных состояний, толщина которой при данном уровне легирования составляла 0.3 мкм [15]), то максимум интенсивности ФЛ КРС наблюдался при электрическом по-

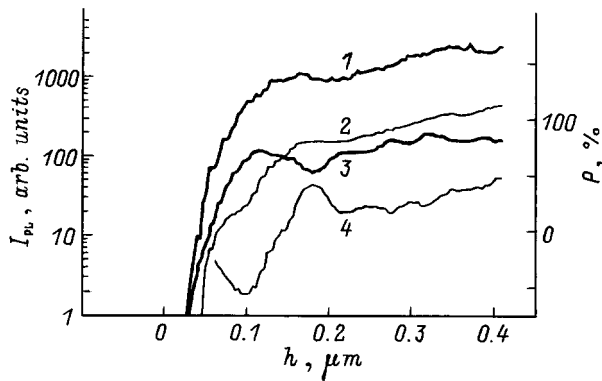


Рис. 2. Зависимость интенсивности торцевой ФЛ I_{PL} (1–3) и степени поляризации P (4) одиночного КРС InGaAs от толщины покровного слоя GaAs h . 1 — полная интенсивность; 2 — интенсивность ФЛ, поляризованной в плоскости КРС (0°); 3 — интенсивность ФЛ, поляризованной в направлении нормали к КРС (90°).

ле световой волны E , параллельном плоскости слоя (0°), а минимум — при перпендикулярном направлении (90°). В диапазоне $0 \div 0.2$ мкм толщина покровного слоя сильно влияла на поляризацию торцевой ФЛ. При уменьшении его толщины степень поляризации уменьшалась и даже меняла знак, достигая значения $P = -60\%$, характерного для переходов с участием состояний легких дырок.

На структуре InP/InAs/InP с таким же уровнем легирования наблюдалась такая же закономерность, но при толщинах покровного слоя на $30 \div 60$ нм меньше, что согласуется с характерной для этого материала меньшей высотой поверхностного барьера.

Влияние электрооптического эффекта должно было бы привести к плавному изменению направления поляризации при изменении расстояния между излучающим торцом и линией перемещения возбуждаемого лучом лазера пятна. Однако этого не наблюдалось. Поэтому наиболее вероятной причиной изменения поляризации можно считать нарушение симметрии потенциального профиля КЯ электрическим полем барьера.

Отклонение потенциального профиля от прямоугольного может быть обусловлено не только электрическим полем, но и неравномерным распределением концентрации индия в КЯ вдоль направления роста. Для изучения его влияния на поляризацию были выращены структуры $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ с заведомо несимметричным относительно середины КЯ распределением индия.

Контрольные образцы представляли собой "симметричные КЯ". Они содержали слой $In_xGa_{1-x}As$, во время роста которого (9 с) поток ТМИ поддерживали постоянным или увеличивали в середине на 3 с. При выращивании несимметричных КЯ в начале или в конце выращивания поток ТМИ увеличивали в течение 2 с. Толщина покровного (и буферного) слоя составляла 0.4 мкм и была много больше толщины области пространственного заряда, составлявшей в этой серии образ-

цов 50 нм (образцы 2246–2249, уровень легирования $n = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Толщина КЯ составляла 5 нм. Результаты приведены в табл. 1. Состав КЯ с преднамеренно измененным профилем распределения индия, вычисленный по данным о режиме роста КЯ, указан последовательно в направлении роста. Кроме того, в табл. 1 приведены данные, полученные на нелегированных МПС с такими же КЯ (структуры 2234–2237).

Действительно, оказалось, что наибольшая степень поляризации торцевой ФЛ наблюдается у контрольных образцов и образцов с увеличением концентрации индия в середине КЯ. Увеличение концентрации индия вблизи одной из гетерограниц уменьшает степень поляризации и сопровождается небольшим сдвигом энергии максимума (на $0.01 \div 0.02$ мэВ) в сторону больших энергий. Наименьшая степень поляризации наблюдается при увеличении концентрации индия вблизи границы с подложкой. Последнее можно понять, если учесть, что сегрегация индия при использованных температурах роста приводит к проникновению некоторого количества индия в покрывающий слой [16] и в результате к снижению потенциального барьера с этой стороны КЯ. Поэтому даже в контрольном образце потенциальный профиль не является вполне симметричным относительно середины ямы. Помещение слоя с повышенной концентрацией индия со стороны подложки приближает потенциальный профиль к треугольной форме. Такой же слой, помещенный с противоположной стороны, действует в противоположном направлении. Результаты, полученные на МПС и одиночных КРС, согласуются (табл. 1).

Таблица 1. Параметры структур $In_xGa_{1-x}As/GaAs$

№ структуры	Тип структуры	x	$h\nu_A$, эВ	P , %
2246	КРС	0.13	1.434	35
2247	КРС	0.15/0.10	1.447	9
2248	КРС	0.11/0.16	1.454	31
2249	КРС	0.9/0.14/0.9	1.440	36
2234	МПС	0.16	1.416	33
2235	МПС	0.23/0.15	1.439	10
2236	МПС	0.13/0.21	1.428	22
2237	МПС	0.13/0.21/0.13	1.412	32

Таким образом, измерения поляризации торцевой ФЛ КЯ с непрямоугольным профилем подтверждают зависимость степени поляризации от симметрии потенциального профиля КЯ.

2. Многослойные структуры In(Ga)As/GaAs

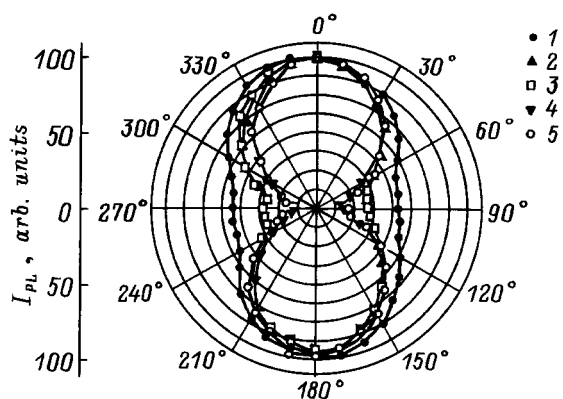
ФЛ многослойных структур In(Ga)As/GaAs также была поляризована параллельно плоскости слоев. Степень поляризации для КЯ (на длине волны максимума спектра) оказывалась при этом около 30%. При тех же параметрах образца ФЛ КТ была поляризована зна-

Таблица 2. Параметры многослойных структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

№ структуры	Тип структуры	x	Толщина InGaAs , нм	Концентрация носителей (на один период) n, p , см^{-2}	$h\nu_A$, эВ
1848	КЯ	0.2	4.5	$p, 10^{11}$	1.389
1966	КТ	1	0.65	$p, 10^{11}$	1.412
1959	КТ	1	0.76	$n, 10^{11}$	1.395
1960	КТ	1	0.73	$p, 10^{12}$	1.393
2065	КТ	0.5	3.4	$n, 3 \cdot 10^{10}$	1.282

чительно сильнее: $50 \div 100\%$. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности ФЛ многослойных структур $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ в максимуме спектра от угла поворота поляризатора. Параметры исследованных образцов приведены в табл. 2.

На рис. 3 показано, что, как и следует из правил отбора [17], при рекомбинации термализованных носителей, находящихся на основных уровнях энергии в квантовом слое, угловая зависимость интенсивности ФЛ имеет форму восьмерки, вытянутой в плоскости слоев структуры перпендикулярно оптической оси. Однако степень поляризации не составляет 100% и зависит от структуры слоя. При понижении степени поляризации форма восьмерки искажается за счет добавления в минимуме света с другой поляризацией (образцы 1848, 1966, 1959). Это результат легко объяснить, если предположить, что за 90° -поляризацию отвечают небольшие по площади участки КРС с сильно несимметричным профилем распределения индия или высокой степенью перемешивания атомов на гетерогранице, в то время как основную площадь КРС $\text{In}(\text{Ga})\text{As}$ занимает КЯ или слой КТ, обладающий поляризацией 0° . Это возможно, например, в результате локальной сегрегации индия [16] или какой-либо электрически активной примеси на одной из гетерограниц.

**Рис. 3.** Зависимости интенсивности ФЛ (нормированной) в максимуме спектра многослойных структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с КЯ и КТ от угла поворота поляризатора. Образцы (табл 2): 1 — 1848, 2 — 1966, 3 — 1959, 4 — 1960, 5 — 2065.

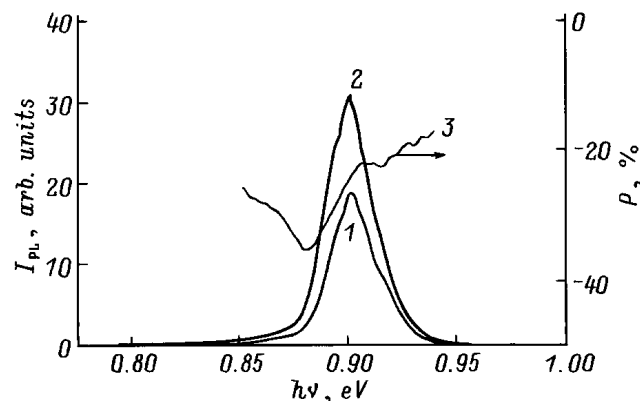
3. Многослойные структуры $\text{InAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{InP}$

В литературе сообщалось, что в структурах $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ с КЯ знак поляризации ФЛ соответствовал знаку механических деформаций [4]. Сообщалось также, что фоточувствительность структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ зависит от поляризации, и направление поляризации, соответствующее наибольшей фоточувствительности, согласуется со знаком механических деформаций твердого раствора [7]. Однако наблюдаемые изменения сигнала были все же существенно меньше 100% .

Полученные в данной работе результаты исследования поляризации ФЛ МПС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ и $\text{InAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ обнаруживают новые особенности поляризации торцевой ФЛ. Оказалось, что даже в том случае, когда кривые рентгеновской дифракции свидетельствовали о деформациях сжатия твердого раствора, их торцевая ФЛ часто поляризована по нормали к плоскости слоев (90° , вектор \mathbf{E} вдоль $[001]$).

На рис. 4 представлены спектры 0° - (кривая 1) и 90° -ФЛ (кривая 2) на МПС с КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x = 0.535$, имеющими толщину 8 нм. Несмотря на то, что кривые рентгеновской дифракции свидетельствовали о наличии тетрагональных деформаций сжатия не менее $4.4 \cdot 10^{-4}$, в максимуме спектра наблюдалась сильная 90° -поляризация: $P = -25\%$. При уменьшении интенсивности возбуждения происходил небольшой сдвиг максимума ФЛ в сторону малых энергий и увеличение степени поляризации до $P = -60\%$.

Такую степень поляризации предсказывают правила отбора для легких дырок [17]. Сдвиг максимума с изменением уровня возбуждения свидетельствует об экранировании электрических полей в КЯ возбужденными носителями. При увеличении уровня возбуждения он уменьшает несимметричность потенциального профиля КЯ. Поэтому в качестве объяснения наличия 90° -поляризации можно принять возникновение во время

**Рис. 4.** Спектральные зависимости интенсивности (1, 2) и степени поляризации (3) ФЛ КЯ. $\text{In}_{0.535}\text{Ga}_{0.465}\text{As}/\text{InP}$. Поляризация: 1 — 0° , 2 — 90° .

роста структуры в КЯ электрических полей, которые приводят к сильно непрямоугольному потенциальному профилю. (Вспомним, что в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ электрическое поле поверхности также приводило к смене направления поляризации). Возникновение этих электрических полей может быть связано с сегрегацией электрически активной примеси.

Слой InAs представляет собой потенциальную яму в КЯ InGaAs . Он служит эффективным стоком возбужденных носителей, поэтому особенности основной линии ФЛ образца должны соответствовать его структуре. Действительно, основная линия ФЛ МПС $\text{InAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ сдвигалась в сторону малых энергий и при увеличении номинальной толщины InAs до 7.5 МС достигала 1.8 мкм (77 К). Величина сдвига соответствовала данным, полученным в работе [18] на образцах, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Абсолютное значение максимума ФЛ располагалось на 0.04 эВ выше по энергии, чем в указанной работе. (Высокая по сравнению с [18] температура роста приводит к тому, что эффективная толщина напряженного слоя несколько снижается из-за обратного испарения). Спектры фотопроводимости находились в согласии с данными ФЛ. Исследование поверхности КРС этих структур с помощью атомно-силовой микроскопии не проводилось, однако гауссова форма основной линии ФЛ свидетельствовала об образовании характерных для КТ нуль-мерных состояний.

Так же, как и в структурах на подложке GaAs , в структурах $\text{InAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ слой InAs подвергается сильным тетрагональным деформациям сжатия. (Несоответствие параметров решетки InAs и InP порядка 3%). Поэтому ожидалось, что его торцевая ФЛ будет поляризована вдоль плоскости слоев — 0° . В образце с малой толщиной InAs это действительно наблюдалось. Исследования на ряде образцов показали, однако, что максимум ФЛ, соответствующий рекомбинации в слое InAs , все-таки может иметь 90° -поляризацию.

На рис. 5, *a* показаны спектры торцевой ФЛ гетероструктуры $\text{In}_{0.537}\text{Ga}_{0.463}\text{As}/\text{InP}$ с тонкими слоями InAs (2.5 МС) в середине КЯ $\text{In}_{0.537}\text{Ga}_{0.463}\text{As}$ (25 нм). Она обладает 0° -поляризацией. Пик А ($h\nu = 0.78$ эВ) соответствует рекомбинации носителей, захваченных слоем InAs , а пик В ($h\nu = 0.8$ эВ) — рекомбинации в слое твердого раствора $\text{In}_{0.537}\text{Ga}_{0.463}\text{As}$. Пик А поляризован сильнее, чем В: $P = 50$ и 20% соответственно.

При увеличении толщины напряженного слоя до 5 МС направление поляризации изменилось (рис. 5, *b*). Приведены спектры 0° - (кривые 1, 3) и 90° - (кривые 2, 4) ФЛ, исходящей из двух взаимно перпендикулярных склонов (кривые 1, 2 и кривые 3, 4). Видно, что в максимуме ФЛ (А) наблюдается сильная 90° -поляризация: $P = 30\%$.

Такое изменение направления поляризации свидетельствует о существовании структурных особенностей, приводящих к участию в рекомбинации состояний типа лег-

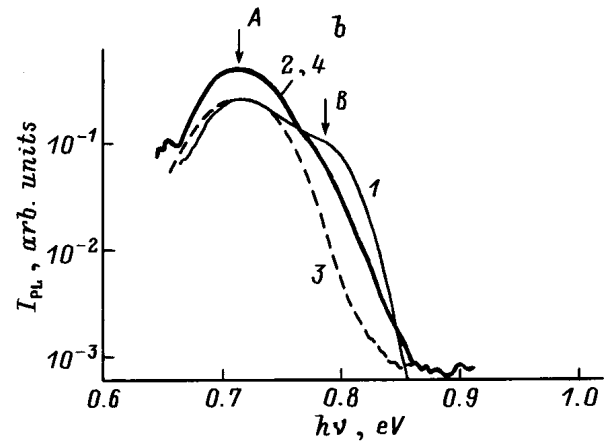
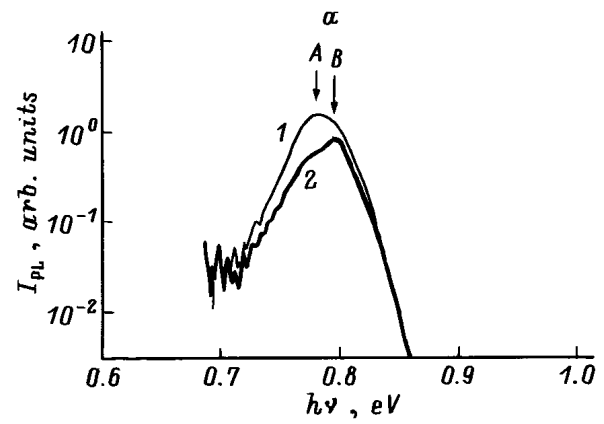


Рис. 5. Спектры фотолуминесценции структур $\text{InAs}/\text{In}_{0.537}\text{Ga}_{0.463}\text{As}/\text{InP}$. *a* — КЯ InGaAs 25 нм, InAs 2.5 МС; поляризация: 1 — 0° , 2 — 90° . *b* — КЯ InGaAs 25 нм, InAs 5 МС; 1, 2 и 3, 4 соответствуют перпендикулярным друг другу торцам; поляризация: 1, 3 — 0° ; 2, 4 — 90° .

ких дырок. Такой особенностью может быть понижение симметрии атомных связей на гетерогранице, приводящее к более высокой, чем в $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$, степени замешивания состояний. Расслоение или возникновение областей структурного упорядочения твердого раствора [19] может также привести к такому эффекту: захвату неравновесных дырок включениями и не прямой (в реальном пространстве) рекомбинации. В не прямой рекомбинации участвует туннелирование, в котором основную роль играют состояния, далеко проникающие в барьер. Обе причины связаны со структурой слоев твердого раствора.

Свойства линии В (рис. 5, *b*) говорят о сложной структуре твердого раствора. При измерении ФЛ из двух перпендикулярных торцов направление поляризации в области линии В не совпадает: кривые 1 и 2 показывают 0° , а полученные при измерении с другого торца кривые 3 и 4 — 90° -поляризацию. Это характерно для упорядоченного твердого раствора [20].

Заключение

В работе экспериментально обнаружено влияние несимметрии КРС In(Ga)As/GaAs на степень поляризации торцевой ФЛ и увеличение степени линейной поляризации торцевой ФЛ при образовании КТ в этих структурах.

В структурах InAs/In_{0.5}Ga_{0.5}As/InP направление поляризации ФЛ напряженных КС и самого твердого раствора изменяется значительно более сложным образом.

Работа поддержана РФФИ (грант 95-02-05610), Министерством науки (Программа ФТНС, гранты 95-2004, 97-1089) и CRDFRESC02.

Список литературы

- [1] R. Sooryakumar, D.S. Chemla, A. Pinchuk, A.C. Gossard, W. Wiegmann, L.J. Sham. *Sol. St. Commun.*, **54**, 859 (1985).
- [2] K. Fujiwara, N. Tsukada, N. Nakayama, T. Nishino. *Sol. St. Commun.*, **69**, 63 (1989).
- [3] D. Gershoni, I. Brener, G.A. Baraff, S.N.G. Chu, L.N. Pfeiffer, K. West. *Phys. Rev. B*, **44**, 1930 (1991).
- [4] K. Uppal, D. Tishinin, P.D. Dapkus. *J. Appl. Phys.*, **81**, 390 (1997).
- [5] G. Malkina, V.Ya. Aleshkin, B.N. Zvonkov, Yu.N. Safyanov. *Phys. Low-Dim. Structur.*, **1/2**, 61 (1997).
- [6] X. Marie, J. Barrau, B. Brousseau, Th. Amand, M. Brousseau, E.V.K. Rao, F. Alexandre. *J. Appl. Phys.*, **69**, 812 (1991).
- [7] D. Gershoni, H. Temkin. *J. Luminesc.*, **44**, 381 (1989).
- [8] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [9] S. Jorda, U. Rossler. *Superlatt. Microstr.*, **8**, 481 (1990).
- [10] E.L. Ivchenko, A.Yu. Kaminski, U. Rössler. *Phys. Rev. B*, **54**, 5852 (1996).
- [11] W.L. Wang, J.L. Liao, B. Xu, Zh. Zhu, B. Yang. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1080 (1995).
- [12] Б.Н. Звонков, И.Г. Малкина, Е.Р. Линькова, В.Я. Алешкин, И.А. Карпович, Д.О. Филатов. *ФТП*, **31**, 1100 (1997).
- [13] Б.Н. Звонков, Е.Р. Линькова, И.Г. Малкина, Д.О. Филатов, А.Л. Чернов. *Письма ЖЭТФ*, **63**, 418 (1996).
- [14] Г.А. Максимов, Д.О. Филатов. *Матер. 2-го всесоюз. совещ. СЗМ-98* (Нижний Новгород, 1998) с. 105.
- [15] A. Chandra, S.E.C. Wood, D.W. Woodard, L.F. Eastman. *Sol. St. Electron.*, **22**, 645 (1979).
- [16] O. Dehaese, X. Wallart, F. Mollot. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 52 (1995).
- [17] G. Bastard, C. Delalande, Y. Guldner, P. Voisin. *Adv. Electron. and Electron. Phys.*, **72**, 1 (1988); C. Weisbuch, B. Vinter. In: *Quantum Semiconductor Structures*, ed. by H.B. Jovanovich (Academic Press, INC. San Diego, CA, 1991).
- [18] В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ф. Цацульников, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, М.В. Максимов, А.А. Суворова, Н.А. Берт, П.С. Копьев. *ФТП*, **31**, 1256 (1997).
- [19] A. Zunger, S. Mahajan. In: *Handbook on Semiconductors* (Elsevier, Amsterdam, 1994) v. 3.
- [20] G.S. Horner, A. Mascarenhas, R.G. Alonso, D.G. Friedman, K. Sinha, K.A. Bertness, J.G. Zhu, J.M. Olson. *Phys. Rev. B*, **48**, 4944 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

In-plane photoluminescence polarization of InAs/Ga(In)As quantum layers, grown by metalorganic vapor phase epitaxy

V.Ya. Aleshkin*, B.N. Zvonkov, I.G. Malkina, Yu.N. Safyanov, D.O. Filatov⁺, A.L. Chernov

Physical-Technical Institute,
N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University,
603600 N. Novgorod, Russia

* Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603600 N. Novgorod, Russia

+ Regional Center for Scanning Microscopy,
Physical-Technical Institute,
N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University,
603600 N. Novgorod, Russia

Abstract Linear polarization of photoluminescence emitted along the plane of InAs/Ga(In)As wafer has been investigated. The dependence of the polarization degree on asymmetry of quantum well shape, quantum dot formation, presence of inclusions in solid alloy was observed.

E-mail: fdp@phys.unn.runnet.ru