

ДИФРАКЦИЯ И РАССЕЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

УДК 548.73

РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, ВЫРАЩЕННЫХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs (100) И (111)A С МЕТАМОРФНЫМ БУФЕРОМ

© 2022 г. М. С. Фоломешкин^{1,2,*}, Ю. А. Волковский^{1,2}, П. А. Просеков^{1,2}, Г. Б. Галиев³,
Е. А. Климов³, А. Н. Клочков³, С. С. Пушкарев³, А. Ю. Серегин^{1,2}, Ю. В. Писаревский^{1,2},
А. Е. Благов^{1,2}, М. В. Ковальчук^{1,2,4}

¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: folmaxim@gmail.com

Поступила в редакцию 24.10.2021 г.

После доработки 24.10.2021 г.

Принята к публикации 06.11.2021 г.

Представлены результаты рентгенодифракционного исследования эпитаксиальных пленок $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенных на подложках GaAs с кристаллографическими ориентациями (100), (111)A в стандартном высокотемпературном и низкотемпературном режимах. С целью согласования параметров подложки GaAs и пленки $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ использовалась технология ступенчатого метаморфного буфера. Разработана методика определения деформационных параметров кристаллической структуры упруго напряженных слоев $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с кристаллографической ориентацией (111) по данным высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии. Определены деформационные параметры кристаллической структуры исследуемых образцов. Выявлена корреляция между углом разориентации слоев $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ относительно подложки GaAs и степенью их релаксации: слои с меньшей величиной релаксации имеют большие углы разориентации относительно подложки.

DOI: 10.31857/S0023476122030079

ВВЕДЕНИЕ

Эпитаксиальные пленки $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенные при пониженной температуре (LTG- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ – low-temperature-grown $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$), являются подходящим материалом для изготовления фотопроводящих антенн – источников и детекторов импульсного терагерцевого излучения, возбуждаемого фемтосекундными импульсами волоконного лазера с длиной волны 1.56 мкм. Низкотемпературный рост приводит к наличию избыточных атомов As в объеме эпитаксиальной пленки и образованию точечных дефектов замещения As_{Ga} (атом As в узле Ga), которые ответственны за захват фотовозбужденных носителей заряда и уменьшение их времени жизни [1]. Относительно толстые изоморфные либо псевдоморфные слои (~100 мкм) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с мольной долей индия $x \sim 0.5$ могут быть выращены на подложках InP благодаря близости их параметров решетки. Однако подложки InP являются более дорогими, более хрупкими и коммерчески менее доступными

по сравнению с подложками GaAs. По этой причине перспективным представляется формирование слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs с использованием технологии метаморфного буфера – толстого переходного слоя с градиентом состава, согласующего параметры решетки подложки и выращиваемого выше слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Дополнительным важным преимуществом метаморфной технологии является возможность выращивания на подложке GaAs относительно бездефектного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с любым значением x . Недостатком данной технологии являются умеренная дефектность и шероховатость поверхности получаемого слоя, которые практически невозможно полностью свести к нулю.

В [2] исследованы фотопроводящие антенны на основе слоев LTG- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенных с помощью метаморфной технологии на подложках GaAs. Выявлено, что амплитуда генерируемых ими терагерцевых импульсов становится в 3–4 раза больше, если LTG- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ выра-

Таблица 1. Дизайн исследуемых образцов

Слой	Толщина, нм	
Активный слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	660	
Ступенчатый метаморфный буфер	$\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.50}\text{Ga}_{0.50}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$	60
	$\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$	60
Буфер GaAs	35	
Подложка GaAs (100), (111)A		

Таблица 2. Технологические условия роста активного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ исследуемых образцов

Пара образцов	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\gamma = P_{\text{As4}}/P_{\text{Ga+In}}$
2V	450	22
4V	200	29
5V*	200	29

* Пара образцов легирована Si.

щен не на стандартной подложке GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (100), а на подложке GaAs с ориентацией (111)A. В [3] была исследована микроструктура этих образцов с помощью атомно-силовой микроскопии и различных методов электронной микроскопии. В частности, было показано, что слои LTG- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ состоят из вертикальных доменов, разориентированных на углы до 3° .

Цель настоящей работы – структурные исследования указанных выше слоев LTG- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и определение их деформационных параметров, а также анализ возможностей данного метода применительно к сильно дефектным эпитаксиальным структурам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемые образцы. Три пары образцов 2V-0, 2V-1, 4V-0, 4V-1, 5V-0, 5V-1 получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полупроводящих подложках GaAs с кристаллографическими ориентациями поверхности (100) (2V-0, 4V-0, 5V-0) и (111)A (2V-1, 4V-1, 5V-1).

Дизайн образцов представлен в табл. 1, технологические условия роста активного слоя указаны в табл. 2. Детальное описание МЛЭ-роста образцов приведено в [3].

Рентгенодифракционные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре SmartLab Rigaku, оснащенный источником излучения с вращающимся анодом (мишень Mo), использована спектральная линия $\text{MoK}_{\alpha 1}$. Регистрацию дифракционных данных осуществляли в двухкристальной схеме с использованием монохроматора Ge-220 двукратного отражения с прорезным каналом и коллимирующих щелей перед образцом и детектором. Щели перед детектором обеспечивали угловое разрешение до 0.02° .

С целью разделения вкладов состава твердого раствора и упругой деформации в полную деформацию решетки активного слоя регистрировали соответствующие пары симметричных и асимметричных относительно среза подложки дифракционных отражений: 400 и 511 для образцов на подложках GaAs (100), 111 и 533 – на подложках GaAs (111)A. В ходе предварительных экспериментов обнаружено, что для симметричных отражений наблюдается наклон кристаллографических плоскостей активного слоя относительно подложки. При регистрации кривых дифракционного отражения (КДО) в отсутствие щелей перед детектором (традиционный метод регистрации двухкристальных кривых качания [4]) получены “смазанные” картины дифракции из-за сильного перекрытия уширенных (вследствие дефектной структуры слоев) дифракционных пиков. С целью регистрации КДО с высоким угловым разрешением образец ориентировали таким образом, чтобы дифракционные отражения активного слоя и подложки находились на плоскости (q_x, q_z) в обратном пространстве на одной прямой вдоль оси q_z , распределение интенсивности вдоль которой соответствует угловому $\theta-2\theta$ -сканированию [4–6]. Отметим, что достаточно низкая контрастность профиля КДО активного слоя при таком способе сканирования существенно снижает точность определения угла Брэгга, что наблюдалось в случае исследуемых образцов на подложках GaAs (111)A.

Уточнение величины угла Брэгга в описанном выше случае осуществляли при таком положении образца, когда дифракционный пик активного слоя смещен вдоль оси q_x в обратном пространстве посредством стандартных процедур юстировки положения образца в методе высокоразрешающей дифрактометрии. Таким образом, при “отстройке” от интенсивности, распределенной вдоль оси q_z , удавалось повысить контрастность (видимость) пика КДО и экспериментально определить значение угла Брэгга активного слоя с необходимой точностью.

Регистрацию карт рассеяния методом картирования обратного пространства [6, 7] для всех образцов проводили в геометрии, описанной выше и обеспечивающей максимальное отклонение дифракционного пика активного слоя от пика подложки вдоль оси q_x . Карты рассеяния, полученные в такой геометрии, иллюстрируют дефектность структуры исследуемых образцов, включая разориентацию (наклон) активного слоя и слоев метаморфного буфера относительно подложки [8].

Расчет параметров структуры. Оценку параметров структуры активных слоев проводили с использованием алгоритма расчета, основанного на итерационном подходе [9, 10]. Данный подход позволяет при анализе деформации решетки эпитаксиальных слоев разделить вклады упругой деформации и начальной деформации, возникающей за счет изменения состава твердого раствора.

По полученным экспериментально значениям углов Брэгга θ_{hkl} рассчитывали соответствующие межплоскостные расстояния d_{hkl} . Далее по паре межплоскостных расстояний вычисляли параметры решетки активного слоя с учетом понижения его симметрии в напряженном состоянии. Вследствие большого рассогласования теоретических параметров решетки подложки и активного слоя использовали приближение тетрагональной сингонии слоя для среза (100) и тригональной сингонии слоя для среза (111)A [11]. В результате для образцов со срезом (100) рассчитывали длины базовых векторов a , c , лежащих в плоскости слоя и в перпендикулярном направлении соответственно; для образцов со срезом (111)A — длину базового вектора a , не лежащего в плоскости слоя, и значение угла α между базовыми векторами. Поскольку в случае среза (111)A вектор a не лежит ни в плоскости активного слоя, ни в перпендикулярном направлении, для удобства дальнейших вычислений рассчитывали эффективные параметры решетки

$$a_e = a\sqrt{2(1 - \cos \alpha)}, \quad (1)$$

$$c_e = a\sqrt{3(2 \cos \alpha + 1)}. \quad (2)$$

Параметр a_e имеет смысл малой диагонали ромба (грань ромбоэдра), лежащей в плоскости слоя, параметр c_e является большой диагональю ромбоэдра, лежащей в перпендикулярном плоскости слоя направлении.

В приближении изотропной деформации в плоскости слоя рассчитывали относительно упругую деформацию ϵ_{\parallel} в данной плоскости [12, 13]. Для среза (100) расчет выполняли по формуле

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{a - c}{c + a \frac{2C_{12}}{C_{11}}}, \quad (3)$$

для среза (111)A — по формуле

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{a_e \sqrt{3} - c_e \sqrt{2}}{c_e \sqrt{2} - a_e \sqrt{3} \frac{4C_{44} - 2(C_{11} + 2C_{12})}{4C_{44} + C_{11} + 2C_{12}}}, \quad (4)$$

где C_{11} , C_{12} , C_{44} — упругие константы (модули) слоя, которые в первом приближении можно принять равными известным упругим константам подложки [10]. Отметим, что в данном случае величина деформации ϵ_{\parallel} выражена относительно параметра решетки слоя a_r в свободном (недеформированном) состоянии, а не относительно параметра решетки подложки. Далее рассчитывали приближенное значение параметра a_r ; для среза (100) — по формуле

$$a_r = \frac{a}{1 + \epsilon_{\parallel}}, \quad (5)$$

для среза (111)A — по формуле

$$a_r = \frac{a_e}{(1 + \epsilon_{\parallel})\sqrt{2}}. \quad (6)$$

После этого в линейном приближении уточняли значения мольной доли индия x и упругих констант C_{ij}^x активного слоя

$$x = \frac{a_r - a^{\text{GaAs}}}{a^{\text{InAs}} - a^{\text{GaAs}}}, \quad (7)$$

$$C_{ij}^x = C_{ij}^{\text{InAs}} x + C_{ij}^{\text{GaAs}} (1 - x), \quad (8)$$

где a^{GaAs} , a^{InAs} , C_{ij}^{GaAs} , C_{ij}^{InAs} — параметры решетки и упругие константы GaAs и InAs соответственно. Далее с использованием уточненных значений расчет итерационно повторяли несколько раз, начиная с выражения (3). Достаточно точное приближение получается после третьей итерации.

Наконец, с использованием полученных уточненных параметров рассчитывали упругую деформацию в перпендикулярном поверхности слоя направлении ϵ_{\perp} и релаксацию слоя R . Для среза (100) расчет выполняли по формулам

$$\epsilon_{\perp} = \frac{c - a_r}{a_r} = -\frac{2C_{12}^x}{C_{11}^x} \epsilon_{\parallel}, \quad (9)$$

$$R = 1 + \frac{\epsilon_{\parallel} a_r}{a_r - a^{\text{GaAs}}} = \frac{a - a^{\text{GaAs}}}{a_r - a^{\text{GaAs}}}, \quad (10)$$

для среза (111)A — по формулам

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{\parallel} \frac{4C_{44}^x - 2(C_{11}^x + 2C_{12}^x)}{4C_{44}^x + C_{11}^x + 2C_{12}^x} = \frac{c_e - a_r \sqrt{3}}{a_r \sqrt{3}}, \quad (11)$$

$$R = 1 + \frac{\epsilon_{\parallel} a_r}{a_r - a^{\text{GaAs}}} = \frac{a_e - a^{\text{GaAs}} \sqrt{2}}{(a_r - a^{\text{GaAs}}) \sqrt{2}}. \quad (12)$$

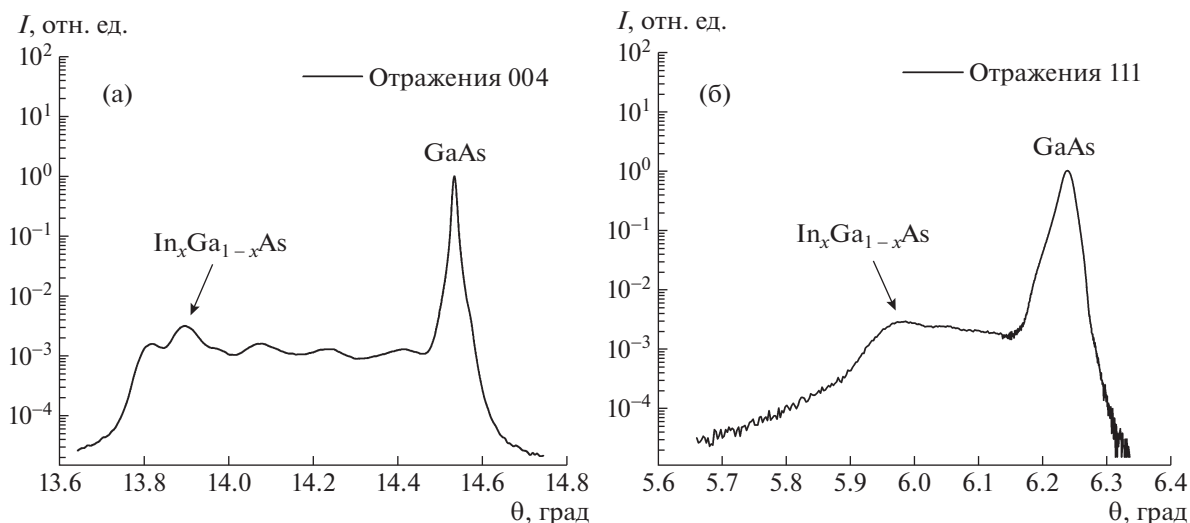


Рис. 1. КДО симметричных рефлексов 004 и 111 образцов 2V-0 (а) и 2V-1 (б) соответственно. Отмечены угловые положения дифракционных пиков подложки (GaAs) и активного слоя ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены КДО симметричных отражений (рефлексов) 004, 111 образцов 2V-0 и 2V-1 соответственно. Для остальных образцов КДО имели аналогичный вид со схожими особенностями. Видно, что помимо дифракционного пика подложки на КДО наблюдается ряд малоинтенсивных пиков, соответствующих метаинтенсивных буферу, а также выделяющийся на фоне остальных несколько более интенсивный пик активного слоя (рис. 1).

Вследствие наличия дефектов кристаллической структуры исследуемых образцов дифракционные пики заметно уширены и перекрываются друг другом. Так, в случае образцов на подложках GaAs (111)A точно определить положение пика активного слоя на КДО весьма затруднительно (рис. 1б). В связи с этим для достаточно точного определения величины угла Брэгга пика активного слоя проводили дополнительную процедуру регистрации дифракционных данных, описанную в предыдущем разделе.

В табл. 3 представлены значения ряда структурных и деформационных параметров активного слоя изученных образцов, определенные в соответствии с развитой методикой и алгоритмом расчета по формулам (3)–(12). Также в последнем столбце табл. 3 приведены экспериментальные значения разориентации (наклона) ω_m активного слоя относительно плоскостей (001) и (111) подложек GaAs (001) и GaAs (111)A соответственно.

Из рассмотрения полученных количественных результатов (табл. 3) видим следующее. Для образца 2V-0 наблюдается почти полная релаксация (99%) активного слоя и, соответственно, относительно малые значения упругих деформаций.

Мольная доля индия на 3% превышает технологически заданное значение, равное 0.53. Разориентация активного слоя относительно плоскостей (001) подложки составляет менее 1° .

Для образцов 4V-1, 5V-0 степень релаксации активного слоя несколько ниже и составляет около 95%. Значения упругих деформаций приблизительно на порядок выше, чем в предыдущем случае. Мольная доля индия также незначительно превышает (не более 4%) технологически заданное значение. Разориентация слоя относительно подложки больше, чем в предыдущем случае, и составляет 1.64° для образца 4V-1 и 1.25° для образца 5V-0.

Для образца 4V-0 степень релаксации составляет менее 90%. Соответственно, значения упругих деформаций несколько выше, чем в предыдущем случае. Мольная доля индия не более чем на 2% превышает технологически заданное значение. Разориентация активного слоя является наибольшей среди образцов на подложках GaAs (100) и составляет 1.51° .

Для образцов 2V-1 и 5V-1 степень релаксации активного слоя составляет около 50 и 40% соответственно. Значения упругих деформаций значительно выше, чем для предыдущих образцов. При этом мольная доля индия более чем на 10% ниже технологически заданного значения. Разориентация активного слоя также наибольшая среди всех исследуемых образцов и составляет 1.74° для образца 2V-1 и 2.23° для образца 5V-1.

Отметим, что у всех образцов на подложках GaAs (100) параллельные и перпендикулярные слою деформации примерно равны, в то время как для образцов с ориентацией (111)A перпендикулярные слою деформации примерно в 2 раза

Таблица 3. Параметры активного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ по данным рентгеновской дифрактометрии

Образец	a , Å	c , Å (α , град)	a_r , Å	x
2V-0	5.8782 ± 0.0024	5.8807 ± 0.0001	5.8794 ± 0.0012	0.558 ± 0.003
2V-1	5.7804 ± 0.0021	89.20 ± 0.02	5.8204 ± 0.0011	0.4126 ± 0.0028
4V-0	5.8457 ± 0.0013	5.90166 ± 0.00004	5.8739 ± 0.0006	0.5446 ± 0.0016
4V-1	5.8751 ± 0.0026	89.873 ± 0.026	5.8815 ± 0.0013	0.563 ± 0.003
5V-0	5.8699 ± 0.0005	5.89439 ± 0.00002	5.8822 ± 0.0002	0.5652 ± 0.0006
5V-1	5.776 ± 0.006	88.97 ± 0.06	5.827 ± 0.003	0.430 ± 0.007
Образец	R , %	$\epsilon_{\parallel} \times 10^{-3}$	$\epsilon_{\perp} \times 10^{-3}$	ω_m , град
2V-0	99.4 ± 0.6	-0.22 ± 0.21	0.22 ± 0.21	0.92 ± 0.01
2V-1	51.9 ± 1.5	-13.83 ± 0.35	6.90 ± 0.17	1.74 ± 0.01
4V-0	87.2 ± 0.3	-4.79 ± 0.12	4.73 ± 0.11	1.51 ± 0.01
4V-1	94.4 ± 1.2	-2.2 ± 0.4	1.13 ± 0.23	1.64 ± 0.01
5V-0	94.64 ± 0.12	-2.09 ± 0.04	2.07 ± 0.04	1.25 ± 0.01
5V-1	41.0 ± 4.0	-17.7 ± 1.0	8.8 ± 0.5	2.23 ± 0.01

Примечание. a , c – параметры решетки тетрагонально деформированного слоя, a , α – параметры решетки тригонально деформированного слоя, a_r – параметр решетки свободного (полностью релаксированного) слоя, x – мольная доля In, ϵ_{\parallel} , ϵ_{\perp} – относительные упругие деформации в плоскости слоя и перпендикулярном направлении соответственно, R – релаксация слоя, ω_m – разориентация (наклон) плоскости слоя относительно поверхности подложки.

меньше параллельных. Это можно объяснить тем, что структуры типа сфалерита являются более жесткими в направлении $\langle 111 \rangle$ [10]. Кроме того, в каждой паре одинаковых образцов на подложках GaAs (100) и GaAs (111)A значения ω_m активного слоя меньше в случае ориентации подложки (100) в сравнении с (111)A. Это согласуется с данными о разориентации, полученными экспериментально в [3]. Разориентация упруго напряженного слоя является одним из механизмов минимизации энергии упругой деформации наряду с релаксацией через образование дислокаций [14], поэтому закономерно прослеживается следующая тенденция: с ростом степени релаксации величина параметра ω_m уменьшается (рис. 2).

Для получения дополнительной информации о структурном совершенстве исследуемых образцов применен метод картирования обратного пространства. На рис. 3 представлены полученные двумерные карты рассеяния в окрестности симметричных отражений 004, 111 образцов 2V-0, 2V-1 соответственно. Для остальных образцов карты рассеяния имели аналогичный вид со схожими особенностями.

Из рис. 3 видно наличие сильного диффузного фона вокруг пиков метаморфного буфера и активного слоя, что говорит о высокой дефектности кристаллической структуры и несовершенстве межслоевых границ исследуемых образцов. При этом видно, что образцы, выращенные на подложках GaAs (100), обладают несколько менее дефектной структурой, так как дифракционные пики на картах рассеяния имеют более отчетливые

границы по сравнению с сильно размытыми (практически неразличимыми) пиками для образцов, выращенных на подложках (111)A. Это хорошо согласуется с результатами [3]. Также на картах рассеяния наблюдается наличие разориентации активного слоя и слоев метаморфного буфера относительно подложки.

Несмотря на высокую дефектность кристаллической структуры исследуемых слоев, данные табл. 3 являются достаточно точными, так как ха-

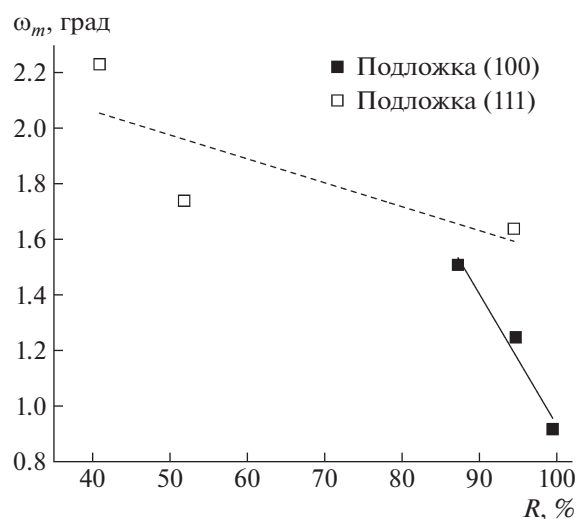


Рис. 2. Зависимость угла разориентации ω_m активного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от степени его релаксации R (табл. 3).

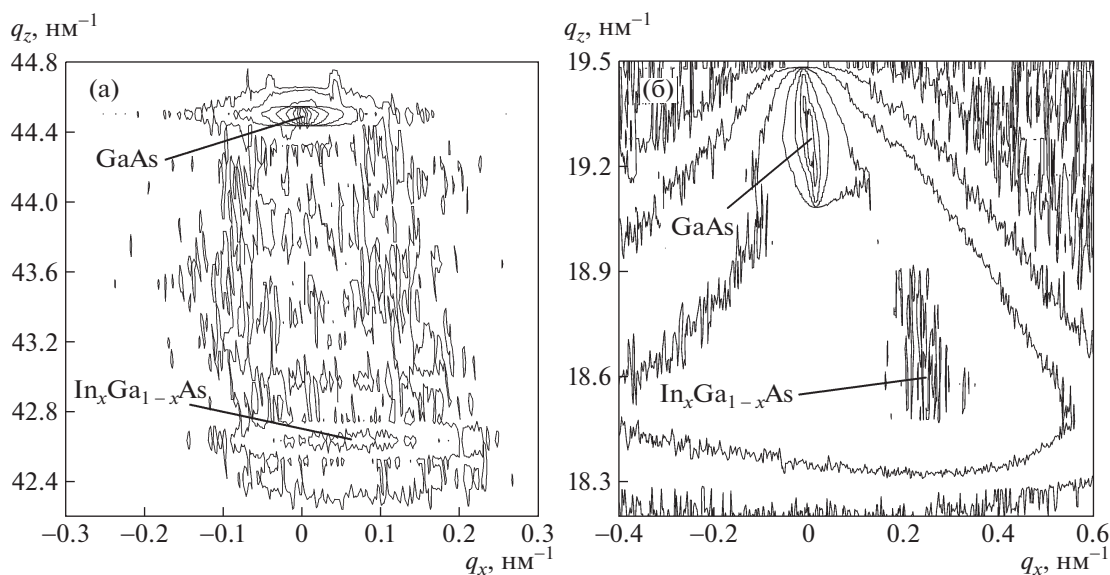


Рис. 3. Двумерные карты рассеяния симметричных отражений 004 и 111 образцов 2V-0 (а) и 2V-1 (б) соответственно. Отмечены положения дифракционных пиков подложки (GaAs) и активного слоя ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

рактически кристаллическую структуру, усредненную по плоскости активного слоя. Таким образом, примененный метод высокоразрешающей дифрактометрии позволяет проводить сравнительный анализ структуры даже сильно дефектных образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены рентгенодифракционные исследования эпитаксиальных пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных методом МЛЭ на подложках GaAs с ориентациями (100), (111)A с использованием технологии метаморфного буфера.

Методом высокоразрешающей дифрактометрии определены структурные и деформационные параметры активного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ исследуемых структур: параметры решетки, состав, упругие деформации и степень релаксации. Продемонстрирована принципиальная возможность исследования и проведения сравнительного анализа сильно дефектных монокристаллических структур с применением методик на основе высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии. Для анализа образцов с ориентацией поверхности (111)A развита методика определения параметров кристаллической структуры эпитаксиальных слоев в приближении тригональной сингонии упруго деформированного слоя. Данная методика применима для анализа эпитаксиальных кубических структур с ориентацией поверхности подложки (111)A в случае относительно большого рассогласования параметров решетки анализируемых слоев и подложки.

Методом картирования обратного пространства показано, что кристаллическая структура исследуемых образцов дефектна; при этом образцы на подложке GaAs (100) имеют более совершенную кристаллическую структуру, более резкие межслоевые границы, а также менее выраженную разориентацию активного слоя и подложки в сравнении с образцами, выращенными на подложках GaAs (111)A. Установлена корреляция между углом разориентации упруго напряженных активных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и степенью их релаксации: менее релаксированный слой имеет больший угол разориентации относительно подложки.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с использованием оборудования ЦКП (проект RFMEFI62119X0035) в части подготовки образцов и в рамках выполнения работ по гранту № 075-15-2021-1362 в части проведения рентгеноструктурных исследований; при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-12043мк) в части развития рентгенодифракционных методов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krotkus A., Bertulis K., Dapkus L. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 3336. <https://doi.org/10.1063/1.125343>
2. Kuznetsov K.A., Galiev G.B., Kitaeva G.Kh. et al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. P. 076201. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aac7bb>

3. *Галиев Г.Б., Трунькин И.Н., Климов Е.А. и др.* // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 6. С. 956. <https://doi.org/10.7868/S0023476117060108>
4. *Bowen D.K., Tanner V.K.* High resolution X-ray diffraction and topography. Taylor & Francis, 1998. 252 p.
5. *Благов А.Е., Галиев Г.Б., Имамов Р.М. и др.* // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 3. С. 355. <https://doi.org/10.7868/S002347611703002X>
6. *Серегин А.Ю., Просеков П.А., Чуховский Ф.Н. и др.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 4. С. 521. <https://doi.org/10.1134/S0023476119040180>
7. *Элиович Я.А., Аккуратов В.И., Таргонский А.В. и др.* // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтр. исследования. 2020. № 8. С. 3. <https://doi.org/10.31857/S1028096020080075>
8. *Holy V., Pietsch U., Baumbach T.* High-Resolution X-Ray Scattering from Thin Films and Multilayers. Springer, 1999. 253 p.
9. *Fewster P.F.* X-Ray Scattering from Semiconductors and Other Materials. 3rd Ed. World Scientific Publishing, 2015. 493 p.
10. *Дроздов Ю.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 2. С. 264.
11. *Peter Y.Yu., Cardona M.* Fundamentals of Semiconductors. Physics and Material Properties. 4th Ed. Springer, 2010. 775 p.
12. *Yang K., Takayoshi A., Schowalter L.J.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 2789. <https://doi.org/10.1063/1.112564>
13. *Bartels W.J., Nijman W.* // J. Cryst. Growth. 1978. V. 44. P. 518. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(78\)90293-2](https://doi.org/10.1016/0022-0248(78)90293-2)
14. *Lee D., Park M.S., Tang Z.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 063523. <https://doi.org/10.1063/1.2711815>