

Исследование структурных параметров гетероэпитаксиальных систем на основе InGaAs/GaAs методами нейтронографии и высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии

Д. В. Ильинов, А. Д. Шабрин, В. В. Садилов, Д. А. Пашкеев

Методами нейтронографии и высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии исследованы структурные характеристики гетероструктур на основе гетеропара InGaAs/GaAs, в том числе многослойной периодической гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs, содержащей 30 периодов. Продемонстрированы необходимость измерения карт обратного пространства около симметричных и асимметричных узлов отражения в дополнение к кривым дифракционного отражения для выявления качественных и количественных параметров кристаллической структуры гетероэпитаксиальных материалов, а также возможность применения такого измерения не только для гетероструктур, представляющих собой одиночный слой на подложке, а также для многослойных периодических эпитаксиальных структур. По результатам измерений методом рентгеновской дифрактометрии вычислены параметры кристаллических решёток слоёв InGaAs и GaAs в вертикальном и латеральном направлениях относительно плоскости поверхности подложки, толщины слоёв l и состав x твёрдого раствора $In_xGa_{1-x}As$ в гетероструктурах, оценена степень релаксации слоёв по измерениям карт обратного пространства около асимметричных узлов отражения. Методом нейтронографии была измерена многослойная гетероструктура, получен профиль толщины слоёв сверхрешётки по глубине структуры, оценены средние значения толщин квантовых ям InGaAs и барьеров GaAs. Установлено соответствие между результатами измерений средних толщин слоёв и периода сверхрешётки для многослойной периодической гетероструктуры различными методами, а также с технологическими ростовыми данными.

Ключевые слова: рентгеновская дифрактометрия, нейтронография, сверхрешётка, многослойная структура, кривая дифракционного отражения, твёрдый раствор InGaAs, гетеропара InGaAs/GaAs, карта обратного пространства.

Ссылка: Ильинов Д. В., Шабрин А. Д., Садилов В. В., Пашкеев Д. А. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 56.

Reference: D. V. Ilinov, A. D. Shabrin, V. V. Sadirov, and D. A. Pashkeev, Applied Physics, No. 5, 56 (2020).

Ильинов Денис Владимирович¹, аспирант, инженер.
Шабрин Алексей Дмитриевич¹, инженер 2 кат.
Садилов Валентин Викторович^{2,3}, аспирант, инженер.
Пашкеев Дмитрий Александрович^{1,4}, гл. спец.,
 доцент, к.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: dv.iljinov@physics.msu.ru

² Государственный университет «Дубна».

Россия, 141982, Московская обл., г. Дубна,

ул. Университетская, 19.

³ Международная межправительственная организация
 Объединённый институт ядерных исследований.
 Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна,
 ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: sadirov@jinr.ru

⁴ МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 08 октября 2020 г.

© Ильинов Д. В., Шабрин А. Д., Садилов В. В.,
 Пашкеев Д. А., 2020

Введение

Развитие микроэлектроники, оптоэлектроники, в частности, фотодетекторов на основе полупроводниковых материалов предъявляет новые требования к качеству и точности исследования таких материалов, являющихся активными элементами такого вида приборов. В настоящее время наибольший интерес для микро- и фотоэлектроники представляют гетероэпитаксиальные структуры, сверхрешётки на основе полупроводников группы A_3B_5 [1]. Сверхрешётки с квантовыми ямами на основе гетеропары AlGaAs/GaAs являются основой QWIP-детекторов [2], гетеропара InAs/GaSb и твёрдые растворы из этих материалов применяются в детекторах на сверхрешётках второго рода (T2SL-детекторы) [3], многоспектральных детекторах ИК-диапазона. Структуры на основе InGaAs/GaAs используются в ряде приборов микроэлектроники, например, в HEMT-транзисторах, а также при создании инжекционных лазеров, светодиодов [4, 5] и фотодетекторов [6]. Однако, высокие рабочие характеристики фотоприёмных устройств третьего и четвёртого поколений зависят от качества и параметров фоточувствительных материалов, используемых в них. Например, спектральные характеристики приборов на основе эпитаксиальных слоёв из полупроводников группы A_3B_5 определяются их составом и количеством, особенностями и состоянием их кристаллической структуры, а также соответствием ростовым технологическим параметрам. Поэтому требуются контроль и характеристика свойств и параметров выращиваемых эпитаксиальных материалов для нано- и микроэлектроники, лазеров и другой техники. В связи с этим в данной статье предлагаются соответствующие возможные методы исследований, в том числе для многослойных структур.

Методы и объекты исследования

Неразрушающие методы высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии позволяют изучать кристаллическое состояние и вычислять параметры гетероэпитаксиальных структур [7]. Традиционным подходом метода рентгеновской дифрактометрии является измерение кривых дифракционного отражения

(КДО) разных типов, с помощью которых можно определить толщины слоёв и периода многослойной структуры, состав твёрдого раствора, а также убедиться в наличии или отсутствии дефектов образца: мозаичности, кривизны, дислокаций. Они могут помочь выявить неоднородность распределения параметров по пластине в том числе.

В то же время кривые дифракционного отражения (КДО) от многослойных структур имеют довольно сложный вид, обусловленный многократными отражениями на межслоевых границах. К тому же не только сложный вид дифракционных спектров, но и потеря информации о фазе рассеянной волны, приводят к трудностям в анализе результатов экспериментов по рентгеновской дифрактометрии. В связи с этим при анализе экспериментов по рентгеновской дифрактометрии применяется метод сопоставления экспериментальных и теоретических дифракционных спектров, смоделированных на основе динамической теории рассеяния рентгеновского излучения, учитывающей многократность отражений, а также граничные условия для векторов электромагнитного поля. Однако, во-первых, такой метод иногда может приводить к неоднозначности получаемых таким способом результатов, поскольку возможны корреляции между определёнными параметрами образца [8]. А во-вторых, на вид КДО могут влиять различные дефекты образца, но их влияние может носить однообразный характер и быть неразличимым. Поэтому для дополнения и верификации получаемых данных, понимания причин искажения КДО могут применяться как дополнительные средства и схемы измерения рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, так и совершенно иные методы, например, просвечивающая электронная микроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия, нейтронное рассеяние (нейтронография) и т. д. В качестве дополнительного способа получения информации о материале рентгеновскими методами, помимо измерений КДО, в дифрактометрии используется картирование обратного пространства (КОП) вокруг узлов обратной решётки [9–12].

Картирование обратного пространства около узлов симметричных и асимметричных рефлексов даёт оценку релаксации и наличия напряжений в материале, плотности дислокаций, позволяет вычислить параметры кри-

сталлической решётки и деформацию в перпендикулярном и латеральном направлениях, наличие или отсутствие диффузного рассеяния на КОП свидетельствует о степени дефектности образцов. Положение максимумов подложки и эпитаксиальных слоёв на карте обратного пространства зависит от их деформационного состояния и разориентации их кристаллографических плоскостей. Для КОП симметричного рефлекса 004 значения координат максимумов по оси q_z обратно пропорциональны величине межплоскостного расстояния в перпендикулярном к поверхности подложки направлению, поскольку эта ось обратного пространства параллельна направлению роста структуры. По положению максимумов на симметричных КОП относительно оси q_x может быть оценён угол разориентаций кристаллографических плоскостей слоёв относительно друг друга и подложки, а также от ориентации (001) . На асимметричных КОП несоответствие в вертикальном параметре решётки Δq_z проявляется в разделении вдоль оси q_z пиков в обратном пространстве, связанных со слоем и подложкой, а несоответствие в латеральном параметре решётки Δq_x измеряется вдоль q_x . Анализ КОП позволяет определять несоответствие параметров решёток слоя и подложки m в разных направлениях, выражаемое в терминах латерального a^{\parallel} и вертикального a^{\perp} параметров решёток слоя:

$$a^{\perp} = \frac{l}{q_{00l}}, \quad a^{\parallel} = \frac{\sqrt{h^2 + k^2}}{q_{hko}} \quad (1)$$

$$m^{\parallel} = \frac{\Delta q_x}{q_x} = \frac{a^{\parallel} - a_s}{a_s}, \quad m^{\perp} = \frac{\Delta q_z}{q_z} = \frac{a^{\perp} - a_s}{a_s}, \quad (2)$$

где a_s – параметр кристаллической решётки подложки. При наличии ненулевого значения несоответствия m^{\parallel} появляется релаксация упругих напряжений в системе. Релаксация R в системе определяется как:

$$R = \frac{a^{\parallel} - a_s}{a_l - a_s}, \quad (3)$$

где a_l – ненапряжённый параметр кристаллической решётки слоя, определяемый по закону Вегарда.

Проведено исследование выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке Riber двух гетероструктур на подложках GaAs с ориентацией (001) :

GaAs(подл.)/GaAs(800 нм)/GaAs(55 нм)/({InGaAs(6,2 нм)/GaAs(55 нм)} \times 30)/GaAs(600 нм) (I);

GaAs(подл.)/InGaAs(400 нм) (II).

Исследования образцов проведены на высокоразрешающем рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover в геометрии параллельного пучка с фокусировкой по Брэггу-Брентано, в качестве источника рентгеновских лучей была рентгеновская трубка с медным анодом и длиной волны излучения $\lambda = 0,154$ нм, а в качестве регистратора дифрагированного излучения – сцинтилляционный детектор. Для ограничения угловой расходимости и монохроматизации первичного пучка рентгеновских лучей в рентгенооптической схеме использовались зеркало Гёбеля, четырёхкристальный прорезной германиевый коллиматор-монохроматор конструкции дю Монда-Харта-Бартельса с отражением 220 и несколько угловых апертур, в качестве вторичной оптики применялся германиевый кристалл-анализатор.

Для верификации данных, полученных методами рентгеновской дифрактометрии, образец (I) был исследован на времяпролётном нейтронном рефлектометре (спектрометре) Рефлекс на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2 в Дубне. Данный спектрометр позволяет определять структурные характеристики различных материалов, в том числе многослойных структур (толщины слоёв, шероховатости межслойных границ и свободных поверхностей), и проводить оценку плотностных характеристик вещества в слоях. Измерения проводились по методу времени пролёта.

Экспериментальные результаты

Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия

Для гетероструктур были измерены симметричные кривые дифракционного отражения 004 , асимметричные кривые отражения $224(+)$, а также КОП около различных узлов с использованием кристалла-анализатора, пред-

ставляющие собой совмещённое ω - 2θ - и ω -сканирование. На КДО проявилась диффузная составляющая дифрагированной интенсивности при съёмке в двухосевом режиме. Поэтому были также записаны соответствующие КДО 2θ - ω -сканы в трёхосевой геометрии с использованием кристалла-анализатора для ослабления диффузной составляющей. При этом стали различимы основные интерференционные максимумы, а также дополни-

тельные пики-спутники для многослойной структуры (I).

Симметричные 2θ - ω -сканы 004 для исследуемых структур, записанные с кристаллом-анализатором, представлены на рис. 1 и 2 (чёрные – экспериментальные КДО, красные – теоретические КДО). Теоретические КДО 2θ - ω -сканы были смоделированы с помощью метода матрицы переноса [2] и сопоставлены с экспериментальными КДО.

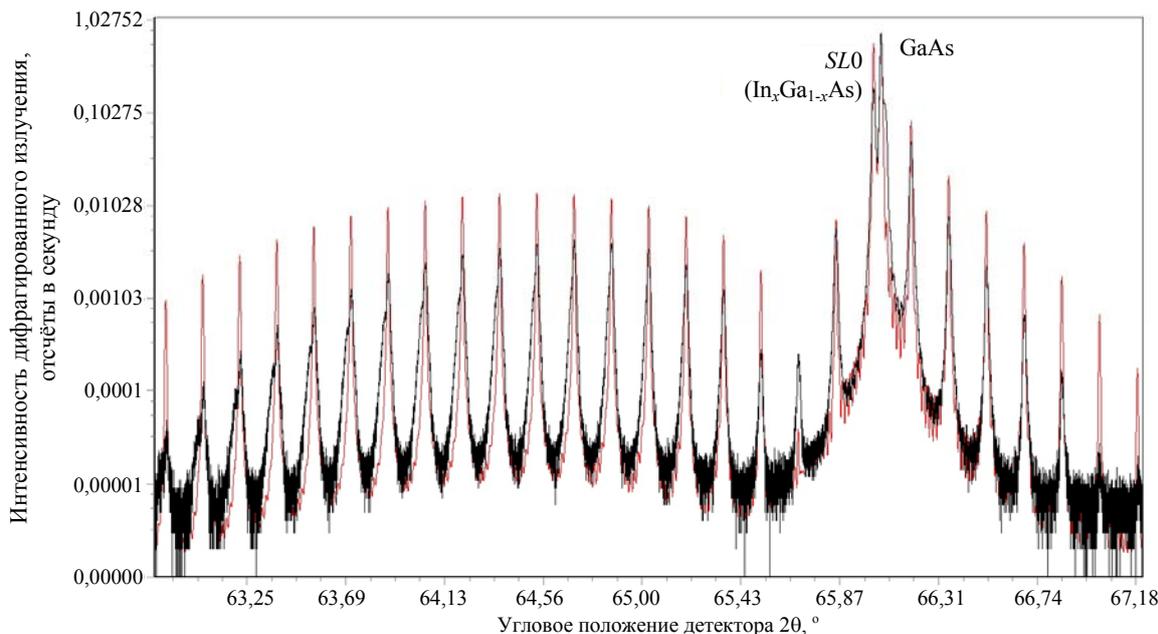


Рис. 1. Теоретическая и экспериментальная кривые дифракционного отражения 004 для гетеро-системы (I).

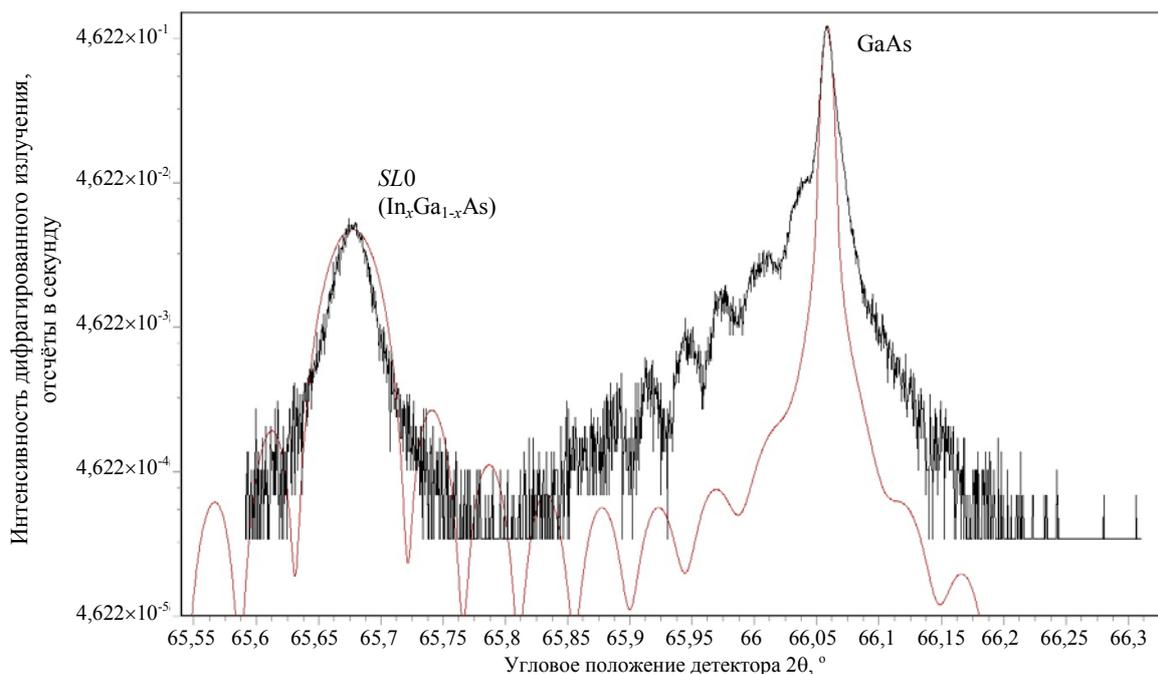


Рис. 2. Теоретическая и экспериментальная кривые дифракционного отражения 004 для гетеро-системы (II).

По положению нулевого SL0 пика $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, находящегося слева от основного дифракционного максимума подложки GaAs, определено среднее значение $x = 20,58\%$ в структуре (I). Средние толщины слоёв и периода сверхрешётки, вычисленные по результатам моделирования спектра рассеяния $l_{\text{GaAs}} = 57,7$ нм, $l_{\text{InGaAs}} = 6,1$ нм, $L_{\text{SL}} = 63,8$ нм. Средняя толщина периода сверхрешётки, рассчитанная по угловым положениям спутников, составила $L_{\text{SL}} \cong 64$ нм. На сопоставленных спектрах присутствует расхождение в интенсивностях спутников и нулевых пиков на двух кривых: на экспериментальной кривой дифракционные максимумы ниже, чем на теоретической, что свидетельствует о дефектности структуры. Отсутствие некоторых осцилляций между спутниками и неполное их совпадение по количеству и положению около пика GaAs подтверждают это.

Для гетеросистемы (II) по измерению КДО также были определены параметры структуры: среднее значение x и толщина для слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ без учёта возможной релаксации слоя InGaAs.

На рис. 3 изображены КОП около симметричного отражения 004 . Во время измерения КОП производилась регистрация рассеянного рентгеновского излучения для выбранного отражения путём сканирования вдоль вектора рассеяния H_{hkl} (H_{001} при симметричной съёмке). Расположение максимумов на КОП 004 на одной линии $q_x = 0$ (нм^{-1}) свидетельствует об отсутствии разориентаций кристаллографических плоскостей относительно ориентации (001) в обеих гетеросистемах. Уширение максимумов вдоль направления q_x является следствием дефектности, мозаичности кристаллической структуры в (I).

Для обеих исследуемых структур были измерены КОП асимметричных отражений $224(+)$, а также $115(+)$ для (I) и $224(-)$ для (II) (рис. 4, 5). При асимметричных съёмках варьировались значения hkl , что позволило разложить векторы рассеяния H_{224} , H_{115} по направлениям $[001]$ (параллельно вектору роста структур) и $[110]$ (направление в плоскости, перпендикулярной к вектору роста структур).

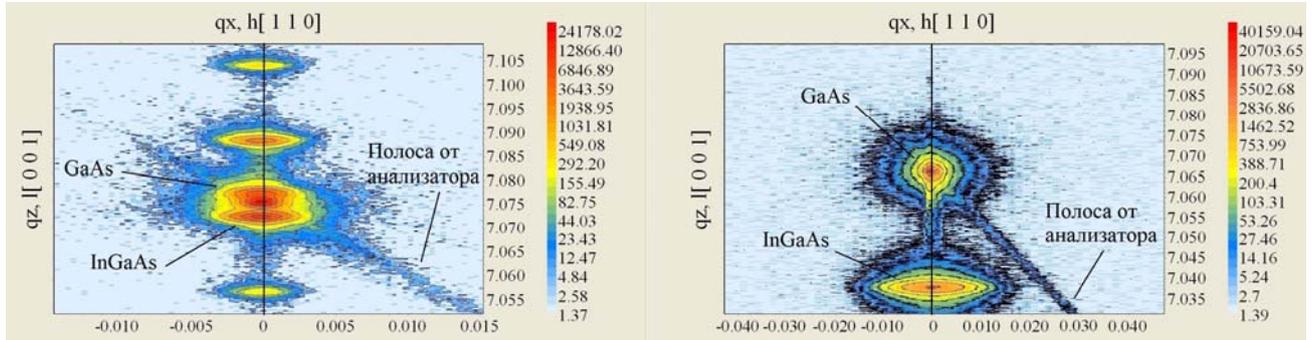


Рис. 3. Фрагменты обратного пространства вблизи узла 004 (слева для (I), справа для (II)).

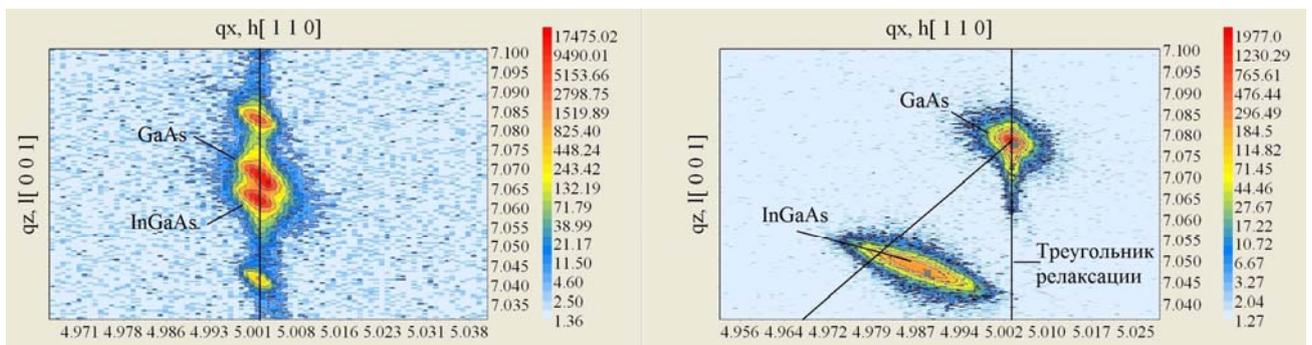


Рис. 4. Фрагменты обратного пространства вблизи узла $224(+)$ (слева для (I), справа для (II)).

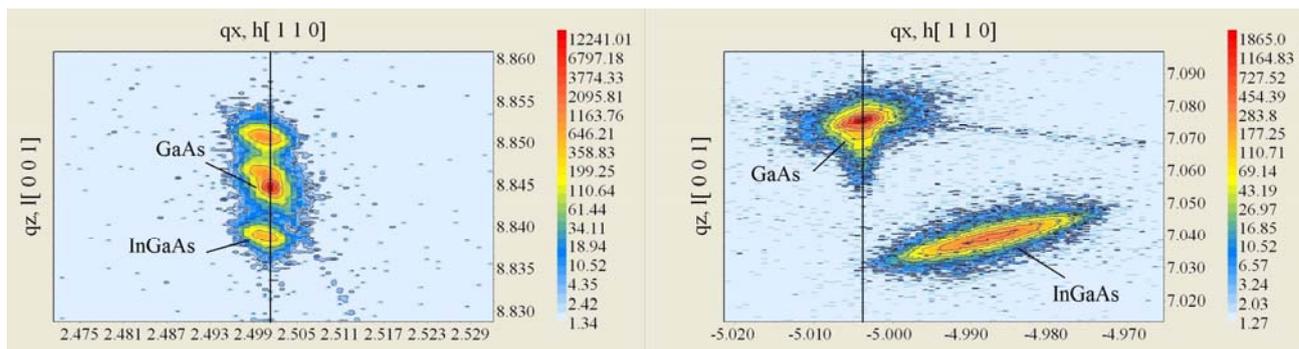


Рис. 5. Фрагменты обратного пространства вблизи узлов 115(+) (слева для (I)) и 224(-) (справа для (II)).

Результаты КОП асимметричных рефлексов 224(+) дают информацию о релаксации упругих напряжений, поскольку по ним можно рассчитать постоянную кристаллической решётки материалов структуры в латеральном направлении. Видно, что для двух исследуемых образцов получается разный результат на КОП 224(+): в случае структуры (I) дифракционные максимумы имеют одинаковые координаты q_x , в то время как для структуры (II) положения максимумов от подложки и слоя имеют разные координаты q_x . Следовательно, слой InGaAs в структуре (II) является частично срелаксированным, а многослойная структура (I) находится в псевдоморфном (напряжённом) состоянии. Диффузное рассеяние на КОП для (I) и (II) говорит о присутствии дефектов в кристаллической структуре материала. По координатам q_x и q_z максимумов различных КОП рассчитаны параметры кристаллических решёток слоёв GaAs и InGaAs для обоих образцов как в направлении роста структуры a^\perp , так и в плоскости роста (латеральном направлении) a^\parallel (табл. 1 и 2).

Из данных табл. 1 видно, что параметры кристаллических решёток InGaAs и GaAs в латеральном направлении структуры (I) совпадают с хорошей точностью, доказывая, что структура псевдоморфна.

Таблица 1

Параметры кристаллической решётки, вычисленные по измерениям КОП около различных узлов обратного пространства образца (I)

КОП	$a^\perp(\text{GaAs})$, нм	$a^\perp(\text{InGaAs})$, нм	$a^\parallel(\text{GaAs})$, нм	$a^\parallel(\text{InGaAs})$, нм
004	0,5653	0,5656	–	–
224(+)	0,5653	0,5655	0,5653	0,5655
115(+)	0,5652	0,5655	0,5656	0,5654

Таблица 2

Параметры кристаллической решётки, вычисленные по измерениям КОП около различных узлов обратного пространства образца (II)

КОП	$a^\perp(\text{GaAs})$, нм	$a^\perp(\text{InGaAs})$, нм	$a^\parallel(\text{GaAs})$, нм	$a^\parallel(\text{InGaAs})$, нм
004	0,5653	0,5682	–	–
224(+)	0,5653	0,5683	0,5653	0,5670
224(-)	0,5653	0,5682	0,5653	0,5671

С помощью измеренной КОП 224(+) для (II) была рассчитана степень релаксации R слоя InGaAs по построенному треугольнику релаксации. С учётом этого были уточнены параметры для гетеросистемы (II), полученные по измерению КДО (табл. 3).

Таблица 3

Параметры гетеросистем (I) и (II), полученные методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии в сравнении с ростовыми параметрами МЛЭ

Гетеросистема	Источник результатов	x – доля In в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, %	Толщина слоя InGaAs, нм	Степень релаксации
(I)	Рентгеновская дифрактометрия	20,58	–	0
	МЛЭ	21,00	–	–
(II)	Рентгеновская дифрактометрия	5,67	236	0,722
	МЛЭ	6,00	400	–

Нейтроннография

Гетеросистема (I) была измерена на нейтронном спектрометре по методу времени пролёта (рис. 6).

На образец падал пучок нейтронов разных длин волн в диапазоне: (1,4–10) Å. Размер пучка, падающего на образец – 1 мм (ширина) × 50 мм (высота). Вращение образца осуществлялось вокруг вертикальной оси, то есть отражение происходило в горизонтальной плоскости. Измерялся времяпролётный спектр (зависимость интенсивности от времени пролёта) прямого пучка (при отсутствии образца)

и отражённого пучков нейтронов. Затем время пролёта переводилось в длину волны нейтронов. Также замерялся спектр фонового нейтронного излучения (с помощью пластинки из кадмия, поглощающей тепловые нейтроны), который затем вычитался из спектров прямого и отражённого пучков. После этого, зная величину угла скольжения, вычислялась зависимость коэффициента отражения от величины переданного импульса $Q = \frac{2\pi}{\lambda} \sin 2\theta$.

Результаты измерений образца (I) на установке Рефлекс представлены на рис. 7.

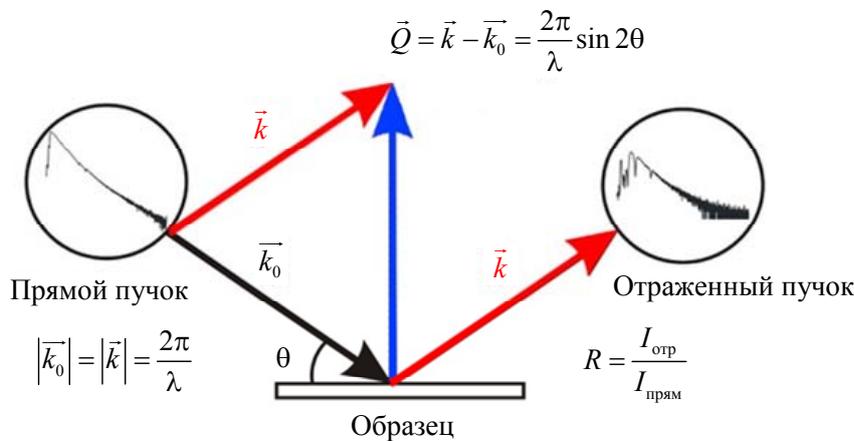


Рис. 6. Техника измерений методом времени пролёта.

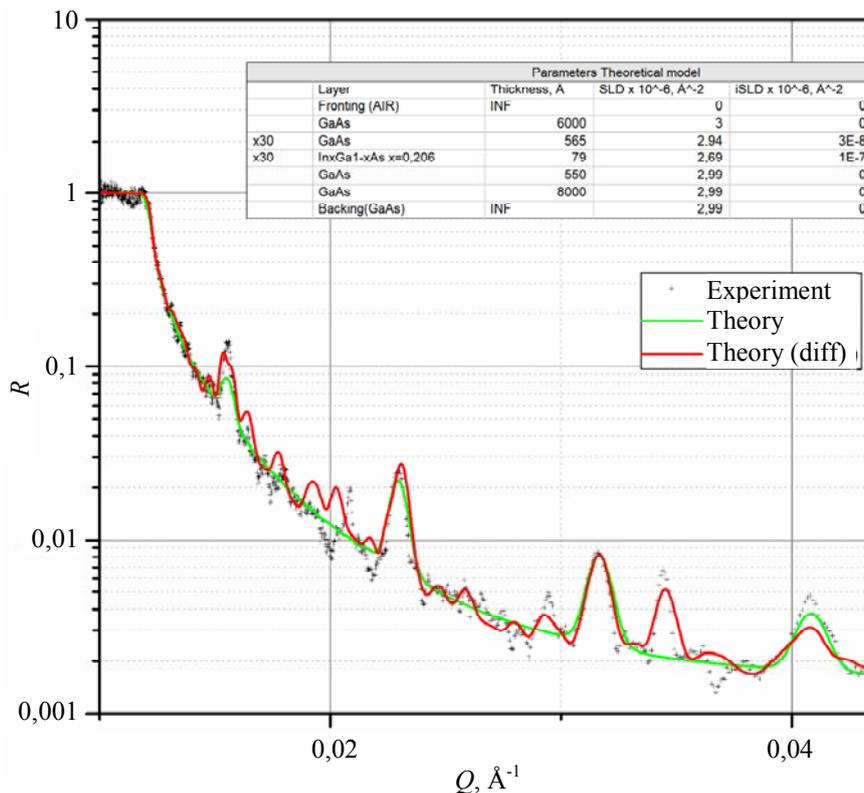


Рис. 7. Теоретические и экспериментальные нейтронные дифракционные спектры от гетеросистемы (I).

По результатам моделирования теоретического спектра (методом генетического алгоритма) и сопоставления его с экспериментальными рассчитаны параметры структуры (I). На рис. 7 присутствуют два варианта моделирования спектра от структуры (I) – зелёный (Theory – не описывает дополнительные максимумы на спектре) и красный (Theory (diff) – описывает дополнительные максимумы). При расчёте красного спектра вычислены толщины каждого слоя структуры (I), в то время как зелёный спектр рассчитан только по средним

значениям толщин для InGaAs и GaAs. В результате была выявлена неоднородность толщин слоёв сверхрешётки InGaAs/GaAs по глубине структуры (I), которую можно наблюдать на профиле плотности длины рассеяния SLD (рис. 8). Послойный вариант моделирования (красный) является более длительным и сложным, однако он точнее описывает дополнительную интерференцию на нейтронном дифракционном спектре и даёт информацию о неоднородности толщин квантовых ям InGaAs и барьеров GaAs.

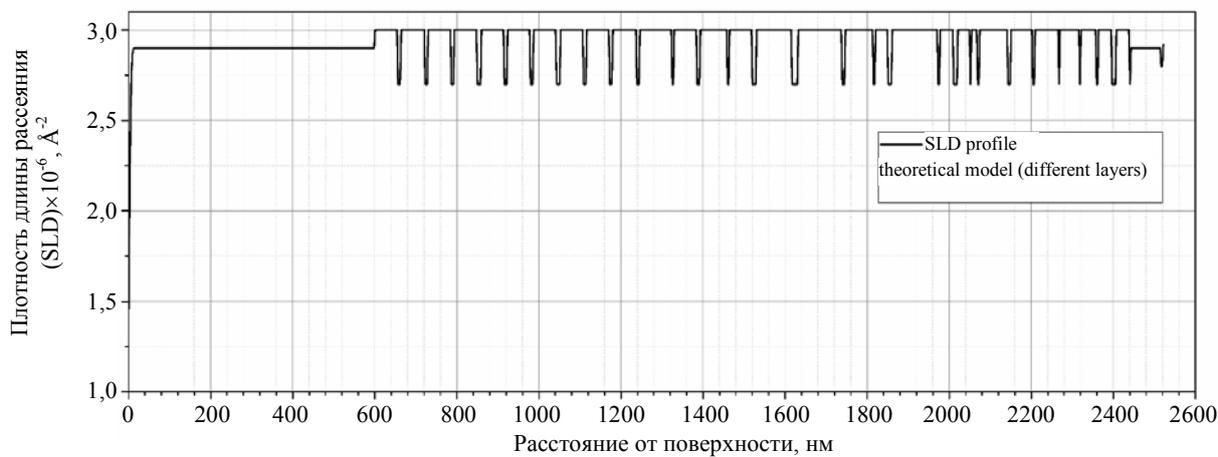


Рис. 8. Профиль плотности длины рассеяния (SLD) для структуры (I).

Таблица 4

Результаты измерений толщин слоёв сверхрешётки структуры (I) методами рентгеновской дифрактометрии и нейтронной спектроскопии в сравнении с ростовыми параметрами МЛЭ

Метод исследования	Слой сверхрешётки в (I)	Средняя толщина слоя, нм	Средняя толщина периода сверхрешётки L_{SL} , нм
Рентгеновская дифрактометрия	InGaAs	6,1	63,8
	GaAs	57,7	
Нейтронная дифракция (1 вариант)	InGaAs	7,9	64,4
	GaAs	56,5	
Нейтронная дифракция (2 вариант)	InGaAs	7,0	64,0
	GaAs	57,0	
Технологические данные МЛЭ	InGaAs	6,2	61,2
	GaAs	55,0	

Исходя из рассчитанной послойно модели, получены средние значения толщин квантовых ямы и барьера структуры (I) (в случае подгонки красного цвета на рис. 7). Сводная таблица результатов измерения толщин слоёв в (I) разными методами приведена выше. Из сопоставления этих данных (табл. 4) видно соответствие между ними, а также с технологическими данными МЛЭ.

Заключение

Методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и нейтронографии исследованы эпитаксиальные гетеросистемы, содержащие твёрдый раствор $In_xGa_{1-x}As$. Для образцов были измерены не только кривые дифракционного отражения, а также карты обратного пространства вокруг симметричных

и асимметричных узлов отражения. Много-
слойная периодическая структура, содержащая
сверхрешётку из 30 гетеропар InGaAs/GaAs,
была измерена на нейтронном спектрометре.

Из анализа полученных в работе данных:

– показано, что для гетероструктур
InGaAs/GaAs, в том числе и многослойных
периодических, имеющих рассогласования по
параметру решётки, требуется измерять карты
обратного пространства для характеристики
дефектности и состояния релаксации парамет-
ров кристаллической решётки;

– исходя из сопоставления теоретиче-
ских и экспериментальных кривых дифракци-
онного отражения, определены средние соста-
вы твёрдого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с учётом
величины степени релаксации обеих гетеро-
структур: $x = 5,67\%$ для образца с одним сло-
ем InGaAs, $x = 20,58\%$ для многослойного об-
разца со сверхрешёткой;

– по картам обратного пространства во-
круг асимметричных узлов отражения $224(+)$
измерена величина степени релаксации слоя
InGaAs толщиной 236 нм на подложке GaAs,
которая составила $R = 0,722$, в то время как
многослойный образец со сверхрешёткой имеет
псевдоморфный характер структуры – $R = 0$;

– по измерению нейтронного дифрак-
ционного спектра от многослойной периоди-
ческой гетеросистемы со сверхрешёткой
вычислены средние значения толщин слоёв
 $l_{\text{GaAs}} = 57,0$ нм и $l_{\text{InGaAs}} = 7,0$ нм и средняя тол-
щина периода сверхрешётки InGaAs/GaAs
 $L_{\text{SL}} = 64,0$ нм, а также выявлена неоднород-
ность толщин слоёв l_{GaAs} и l_{InGaAs} по глубине,
наблюдаемая на SLD профиле структуры;

– обнаружено наличие диффузной со-
ставляющей в рассеянном излучении на кри-
вых дифракционного отражения и областей
диффузного рассеяния на картах обратного
пространства исследованных образцов, объяс-
няемые дефектами кристаллической решётки
выращенных гетероструктур, в том числе

вследствие отличия параметров решёток для
материалов GaAs и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с такими x , ко-
торые были изучены в настоящей работе;

– получено соответствие между резуль-
татами проведённых экспериментов, а также
их согласие с технологическими ростовыми
параметрами гетероструктур.

Применённые в данном исследовании
методы характеристики гетероэпитаксиаль-
ных структур на основе InGaAs/GaAs пригод-
ны и достаточно точны для оценки совершен-
ства кристаллического состояния и
соответствия ростовым параметрам, а также
могут быть использованы для изучения дру-
гих кристаллических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудин А. Л., Кацавец Н. И., Красовицкий Д. М.,
Кокин С. В., Чалый В. П., Шуков И. В. // Прикладная
физика. 2016. № 6. С. 49.
2. Ильинов Д. В., Шабрин А. Д., Гончаров А. Е.,
Пашкеев Д. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 51.
3. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. // Applied
physics reviews. 2017. Vol. 4. P. 031304.
4. Kudrin A., Dorokhin M., Danilov Yu., Malyshe-
va E. // Technical Physics Letters. 2011. Vol. 37 (12). P. 1168.
5. Dorokhin M. V., Malysheva E. I., Zdoroveishev A. V.,
Danilov Yu. A., Kudrin A. V. // Semiconductors. 2012.
Vol. 46. P. 15.
6. Блохин Э. Е., Арустамян Д. А., Алфимова Д. Л. //
Вестник южного научного центра. 2015. Т. 11. № 4. С. 16.
7. Fewster P. F. X-ray scattering from semiconduc-
tors (Imperial College Press, London, 2000). P. 287.
8. Юнин П. А., Дроздов Ю. Н., Дроздов М. Н.,
Новиков А. В., Юрасов Д. В., Захаров Н. Д., Королев С. А. //
Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 3. С. 94.
9. Fewster P. F. // Critical Reviews in Solid State
and Materials Sciences. 1997. Vol. 22 (2). P. 69.
10. Марченков Н. В., Куликов А. Г., Аткин И. И.,
Петренко А. А., Благов А. Е., Ковальчук М. В. // Успехи
физических наук. 2019. Т. 189. С. 187.
11. Аткин И. И., Марченков Н. В., Куликов А. Г.,
Благов А. Е., Ковальчук М. В. // Журнал эксперимен-
тальной и теоретической физики. 2020. Т. 157. № 1. С. 12.
12. Aleshin A. N., Bugaev A. S., Ruban O. A., Shche-
tinin I. V., Tabachkova N. Yu. // Structural Chemistry &
Crystallography Communication. 2017. Vol. 3. № 1:03.

PACS: 61.05.C–, 61.05.F–, 77.55.Px, 68.65.–k, 68.65.Ac, 68.65.Cd

Investigation of structural parameters in heteroepitaxial systems based on InGaAs/GaAs by neutron diffraction and high-resolution x-ray diffractometry

D. V. Ilinov¹, A. D. Shabrin¹, V. V. Sadilov^{2,3}, and D. A. Pashkeev^{1,4}

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² Dubna State University
19 Universitetskaya st., Moscow region, Dubna, 141982, Russia

³ JINR – International intergovernmental organization Joint Institute for Nuclear Research
6 Joliot-Curie st., Moscow region, Dubna, 141980, Russia

⁴ MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernadsky Ave, Moscow, 119454, Russia

Received October 08, 2020

Structural characteristics of heterostructures based on InGaAs/GaAs heteropair, including multilayer periodic heterostructure with InGaAs quantum wells containing 30 periods, were investigated by neutron diffraction and high-resolution X-ray diffractometry. The necessity of measuring the reciprocal space maps near symmetric and asymmetric reflection nodes in addition to the diffraction rocking curves for revealing the qualitative and quantitative features of crystal structure of heteroepitaxial materials was demonstrated, as well as the possibility to apply this measurement not only for heterostructures with a layer on a substrate, but also for multilayer periodic epitaxial structures. The total crystal lattice parameters of the InGaAs and GaAs layers in the vertical and lateral directions relative to the substrate plane, the layer's thicknesses l and the compositions x of the $In_xGa_{1-x}As$ solid solution in heterostructures were calculated by X-ray diffraction measurements, the degree of relaxation of the layers was estimated by measurements of the reciprocal space maps near asymmetric reflection nodes. The multilayer heterostructure was researched by neutron diffraction, the thickness profile of the superlattice layers was obtained over the depth of the structure, and the average thicknesses of the InGaAs quantum well and GaAs barrier were estimated. The correspondence was established between the results of measurements for average layer's thicknesses and the superlattice period for multilayer periodic heterostructure by various methods, as well as with technological growth data.

Keywords: x-ray diffractometry, neutron scattering, superlattice, multilayer structure, rocking curve, solid solution InGaAs, heteropair InGaAs/GaAs, reciprocal space map.

REFERENCES

1. A. L. Dudin, N. I. Katsavets, D. M. Krasovitsky, S. V. Kokin, V. P. Chaly, and I. V. Shukov, Applied Physics, No. 6, 49 (2016).
2. D. V. Ilinov, A. D. Shabrin, A. E. Goncharov, and D. A. Pashkeev, Applied Physics, No. 1, 51 (2019).
3. A. Rogalski, P. Martyniuk, and M. Kopytko, Applied physics reviews **4**, 031304 (2017).
4. A. Kudrin, M. Dorokhin, Yu. Danilov, and E. Malysheva, Technical Physics Letters, **37** (12), 1168 (2011).
5. M. V. Dorokhin, E. I. Malysheva, A. V. Zdoroveishev, Yu. A. Danilov, and A. V. Kudrin, Semiconductors **46**, 15 (2012).
6. E. E. Blokhin, D. A. Arustamyan, and D. L. Alfimova, Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra **11** (4), 16 (2015).
7. P. F. Fewster, *X-ray scattering from semiconductors* (Imperial College Press, London, 2000).
8. P. A. Yunin, Yu. N. Drozdov, M. N. Drozdov, A. V. Novikov, D. V. Yurasov, N. D. Zakharov, and S. A. Korolev, Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics **84** (3), 94 (2014).
9. P. F. Fewster, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences **22** (2), 69 (1997).
10. N. V. Marchenkov, A. G. Kulikov, I. I. Atkinin, A. A. Petrenko, A. E. Blagov, and M. V. Kovalchuk, Physics-Uspekhi **189**, 187 (2019).
11. I. I. Atkinin, N. V. Marchenkov, A. G. Kulikov, A. E. Blagov, and M. V. Kovalchuk, Journal of experimental and theoretical physics **157** (1), 12 (2020).
12. A. N. Aleshin, A. S. Bugaev, O. A. Ruban, I. V. Shchetinin, and N. Yu. Tabachkova, Structural Chemistry & Crystallography Communication **3** (1:03), (2017).