

УДК 54.07

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДВУХКРИСТАЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДИФРАКТОМЕТРОВ

© А. Ю. Разумовский¹, М. А. Чернов¹, А. П. Василенко²,
И. Д. Лошкарев², Е. М. Труханов²

Статья поступила 21 января 2014 г.

Описаны методические возможности двухкристалльных рентгеновских дифрактометров производства ООО ИТЦ «Радикон» для исследования и контроля структуры монокристаллов и тонкопленочных систем различными дифракционными методами, в том числе методами высокого разрешения. Двухкристалльный автоматический рентгеновский дифрактометр ДСО-1Т с большим расстоянием «образец — детектор» и узкой щелью перед детектором обеспечивает картирование в обратном пространстве гетероэпитаксиальных структур с высоким качеством, что продемонстрировано на примере двухслойной гетеросистемы GaAs/Si. Двухкристалльная приставка ПДП к дифрактометру ДРОН-3 имеет пять моторизованных осей, включая XZ столик с диапазоном перемещений 200×200 мм². Эта приставка обеспечивает картирование больших пластин по кривым дифракционного отражения, в частности структур кремния на сапфире. Вертикальный трехосный двухкристалльный рентгеновский дифрактометр ДСО-2П, предназначенный для исследования и контроля монокристаллов диаметром до 101 мм и высотой до 100 мм, оснащен моторизованной приставкой линейного перемещения детектора на 100 мм и моторизованным поворотным сменщиком щелей перед детектором. Гибкость программного обеспечения рентгеновских дифрактометров производства ООО ИТЦ «Радикон» обеспечивается встроенным редактором пользовательских макросов.

Ключевые слова: двухкристалльный дифрактометр; высокое разрешение; картирование узлов в обратном пространстве; параметр решетки; кривая дифракционного отражения.

В настоящее время в России наряду с развитием аппаратного и методического обеспечения синхротронных станций [1 – 3] диагностики различных материалов обновляется и лабораторное оборудование университетов, институтов и производственных предприятий. При этом рентгеновские дифрактометры для исследования монокристаллов и пленочных структур обеспечивают значительную часть аналитических методов.

Наряду с импортными дифрактометрами [4] используются и специализированные рентгеновские дифрактометры высокого разрешения, выпускаемые компанией ИТЦ «Радикон» (Санкт-Петербург) [5] на протяжении 22 лет. Дифрактометры высокого разрешения и комплектующие к ним изготавливаются по заказам зарубежных университетов и фирм (1997, 1999, 2001, 2003, 2005 гг.), а также российских организаций. Модернизация порошковых дифрактометров, прежде всего российских, также позволяет создавать на их основе дифрактометры высокого разрешения для исследования монокристаллов.

Гибкое программное и развитое методическое обеспечение в ИТЦ «Радикон» дает возможность автоматически ориентировать кристаллы, картировать

полупроводниковые пластины по кривым качания и проводить прецизионные измерения параметров кристаллической решетки.

На конференциях [6 – 8] были представлены доклады с характеристиками двухкристалльного дифрактометра ДСО-1Т, изготовленного по заказу ИФП СО РАН. Отличительными особенностями рентгенооптической схемы дифрактометра ДСО-1Т (рис. 1) являются большой диапазон углов дифракции узла монокроматора ($\vartheta_{\text{мон}} = 0 - 62,5^\circ$), четыре автоматизированных и четыре ручных оси перемещения и юстировки образца, а также возможность удаления детектора от образца на расстояние от 100 до 300 мм. Последнее позволяет использовать детектор с узкой щелью в качестве анализатора дифрагированного пучка при различных углах отклонения образца от точного брэгговского положения. По существу данный дифрактометр позволяет картировать узлы обратной решетки в обратном пространстве, что обычно реализуется на трехкристалльных дифрактометрах. Регулируемая щель перед детектором дает возможность изменять его угловую апертуру в широком непрерывном диапазоне (0 – 10 мм). Модернизированный гониометр ГУР-9 с разделенными приводами и дополнительными планетарными редукторами обеспечивает дискретность угловых перемещений $0,0000625^\circ$ для образца и $0,00013^\circ$ для детектора. Дискретность угловых датчи-

¹ ООО ИТЦ «Радикон», Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: chernov@radicon.spb.ru

² Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия.

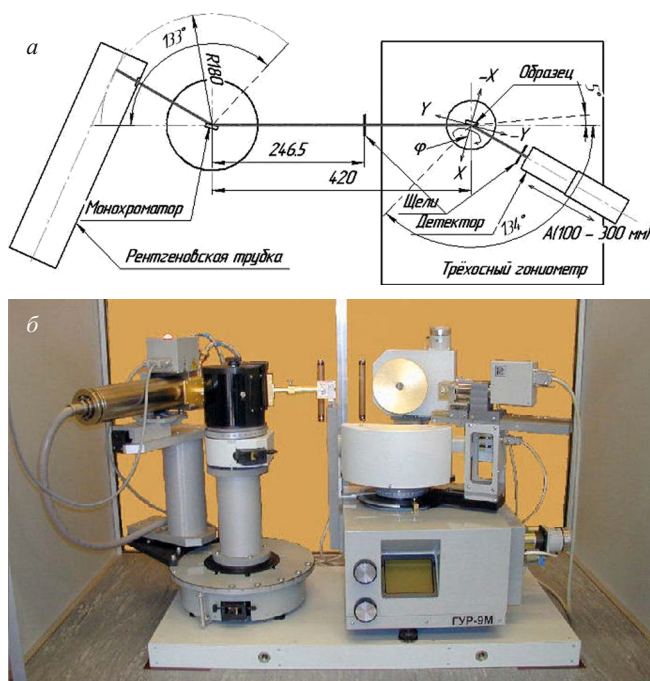


Рис. 1. Рентгенооптическая схема (а) и внешний вид (б) автоматического двухкристального дифрактометра ДСО-1Т

ков на обоих червяках составляет $0,0000625^\circ$. Так как исследовались пленки GaP и GaAs на кремнии, то минимальное угловое расстояние между пиками подложки и слоя составляло сотни — тысячи угловых секунд. В такой ситуации использование щели 0,05 мм перед детектором, установленным на расстояние 200 — 300 мм от образца, позволяло существенно уменьшить время накопления сигнала относительно схемы с кристаллом-анализатором [9, 10].

На рис. 2 представлены карты для образцов St953 (рис. 2, а) и St958 (рис. 2, б); апертура щели-анализатора составляла $100''$.

Съемки проводились в сечении поперек ступеням, расположенным в границе раздела (ГР) вицинальной плоскости (001). Плоскость дифракции перпендикулярна поверхности.

На картах рассеяния темные области (пики рассеяния) являются узлами 004 обратных решеток подложки и пленки. В области начала координат на всех картах находится узкий и интенсивный пик подложки. Пик от слоя GaAs расположен в нижней части карты и имеет эллиптическую форму. Смещение пика GaAs вдоль оси q_z от положения пика подложки свидетельствует о различных параметрах кристаллических решеток подложки (a_s) и пленки (a_f). Вертикальное расстояние между пиками [$q_{z(s)} - q_{z(f)}$] пропорционально разности ($a_s - a_f$). Величина горизонтального расстояния между пиками [$q_{y(s)} - q_{y(f)}$] характеризуется как исходной разориентацией подложки [плоскость (001) не параллельна ГР], так и взаимным разворотом кристаллических решеток эпитаксиального слоя и подложки ψ . Чтобы горизонтальное расстояние между

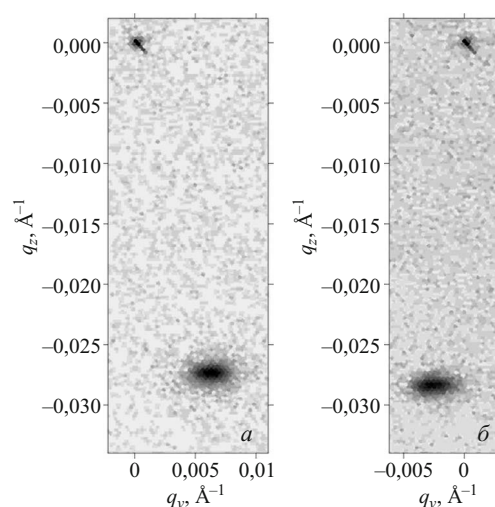


Рис. 2. Карты распределения интенсивности вблизи узла обратной решетки 004 подложки кремния (верхний пик) и эпитаксиальной пленки GaAs (нижний пик) для двух вариантов структурного состояния пленки GaAs на Si(001) в зависимости от способа формирования первого монослоя: осаждение As на Si (а) и замещение верхнего монослоя Si атомами As (б)

пиками стало равным ψ , были построены карты $\omega/\Delta\theta$ (рис. 3).

Ось $\Delta\omega$ соответствует сканированию образца, т.е. изменению его углового положения при неподвижном детекторе (ω — сканирование); а ось $\Delta\theta$ соответствует 2θ -сканированию, когда перемещается детектор со щелью-анализатором при неподвижном образце. По осям отложены относительные угловые координаты положений образца ($\Delta\omega$) и анализатора ($\Delta\theta$), в начале координат находится пик подложки. Черной пунктирной линией показано угловое положение пика подложки, сплошной — пика пленки GaAs. По этим картам в угловых координатах легко определить угол разворота кристаллической решетки пленки, поскольку он равен горизонтальной угловой координате пленки. Для образца St953 он составляет $\Delta\omega_f = \psi = 1000''$ в сторону уменьшения отклонения от сингулярной ориентации, а для образца St958 — $\Delta\omega_f = \psi = -1600''$ в сторону его увеличения. Отрицательный знак разворота означает, что пик пленки отклонен вправо от пика подложки.

Уширение пика GaAs по горизонтали показывает, что в случае отражения 004 в большей мере присутствует разброс по ориентациям в пленке, чем по деформациям (по параметру решетки). На картах вблизи пика подложки видна полоса, направленная вправо вниз. Эта вытянутая область возникает из-за достаточно большого (по сравнению с шириной пика подложки, которая составляет около $40''$) углового диапазона пропускания анализатора.

Для образцов St953 и St958 причина противоположных разворотов решеток пленок связана с механизмом формирования первого монослоя эпитаксиальной пленки GaAs, а точнее — монослоя As [11]. В образце St953 (знак разворота принят отрицатель-

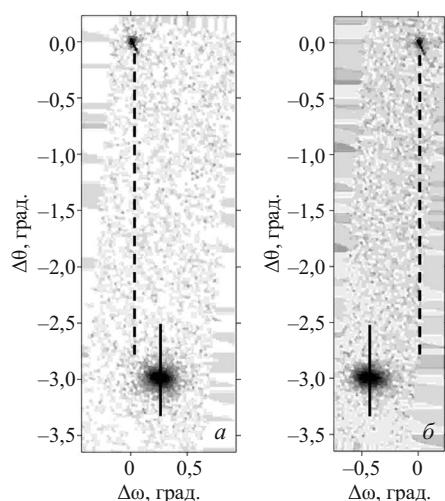


Рис. 3. Карты распределения интенсивности (см. рис. 2), построенные в угловых координатах изменения углового положения образца $\Delta\omega$ и углового положения детектора $\Delta\theta$

ным) зарождение пленки начиналось с осаждения As, а в образце St958 ($\psi > 0$) пленка зарождалась путем замещения [11, 12].

На картах (см. рис. 3) видно, что угловое положение пика пленки по оси $\Delta\theta$ равно приблизительно 3° . Анализ показывает, что это соответствует степени релаксации ρ пленки GaAs, близкой к 100 %. Точность измерения положения пика на карте равна $0,05^\circ$, что приводит к разбросу значений ρ на 2 % при расчете степени релаксации.

Дифрактометр ДСО-1Т позволяет также картировать монокристаллические пластины диаметром до 150 мм по кривым дифракционного отражения (КДО), осуществляя сканирование $R - \varphi$ -методом [13]. При этом учет уширения КДО из-за непараллельности векторов дифракции образца и монохроматора осуществляется по формулам, приведенным в работе [13].

Для серийного контроля качества полупроводниковых структур по КДО в ИТЦ «Радикон» была разработана двухкристальная приставка ПДП к отечественному рентгеновскому дифрактометру ДРОН-3. Рентгенооптическая схема и внешний вид дифрактометра с приставкой ПДП представлены на рис. 4.

Приставка отличается пятиосным держателем образца, все приводы которого автоматизированы за счет шаговых двигателей. В сочетании с разделенными $\vartheta - 2\vartheta$ приводами модернизированного гониометра ГУР-8, а также за счет гибкого программного обеспечения RDPW обновленный дифрактометр позволяет автоматически картировать пластины размером до 200×200 мм² (XY-стол). Двухкоординатная карта автоматической съемки задается либо вручную, либо автоматически по диаметру анализируемой области и числу анализируемых участков. Первое применение приставки ПДП нашла для контроля эпитаксиальных структур кремния на сапфире. Результат картирования представляется в виде таблицы, каждая строка ко-

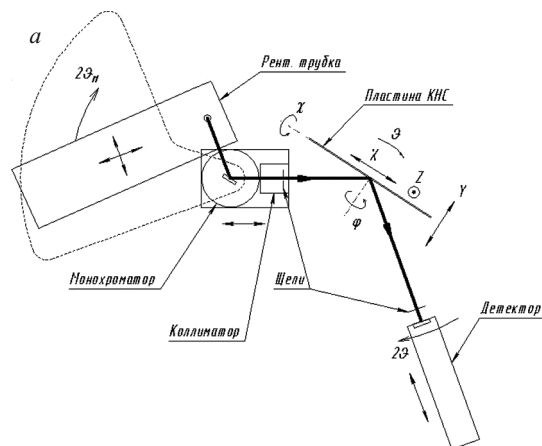


Рис. 4. Рентгенооптическая схема (а) и внешний вид (б) приставки ПДП к дифрактометру ДРОН-3

торой соответствует одной точке (пятну) на образце. В таблице представлены типичные результаты картирования одного из образцов кремния на сапфире диаметром 100 мм с толщиной пленки 0,5 мкм.

Интегральный коэффициент отражения и коэффициент асимметрии определяются по формулам

$$R_i = \frac{1}{mI_0} \Delta\vartheta \sum_m I_i;$$

$$K_{asym} = W_{left}/W_{right}. \quad (1)$$

Здесь m — число интервалов, на которое разбивается пик с основанием $3W$; $\Delta\vartheta$ — угловая ширина единичного интервала; I_i — средняя интенсивность на i -м интервале; W_{left} и W_{right} — левая и правая (от максимума) части полуширины пика. Следует принять $m = 20$. Среднее значение фона I_{BG} определяется по шести точкам на краях интервала сканирования (как правило, $\pm 1^\circ$ от максимума по шкале ϑ): три точки на левой границе кривой и три точки на правой.

Трехосный двухкристальный $\vartheta - \vartheta - \varphi$ дифрактометр ДСО-2П (рис. 5) отличается тем, что плоскость дифракции расположена вертикально, а блок монохроматоров закреплен на кожухе рентгеновской труб-

ки и содержит два кристалла-монокроматора, настроенных на характеристическое излучение.

Источник излучения и сцинтилляционный детектор при вращении опускаются вниз под столешницу оперативного стола, а образец диаметром от 9 до 101 мм и толщиной 0,2 – 100 мм кладется сверху на специальный столик, связанный с ФИ-гониометром, закрепленным на П-образном кронштейне. Кристаллы меньшего диаметра, в том числе субмиллиметровые, должны устанавливаться в специальных кюветах. Конструкция блока монокроматоров такова, что позволяет достигать больших углов дифракции образца вплоть до $\vartheta = 86^\circ$ со вторым монокроматором. Нулевое значение брэгговского угла возможно только с первым монокроматором.

Перед окном детектора размещен поворотный сменщик щелей. Одна из щелей полностью открывает окно детектора в режиме поиска отражения от разориентированного (до 10°) кристалла. Детектор со сменщиком щелей установлен на каретке с моторным приводом, обеспечивающим управляемое перемещение детектора вдоль дифрагированного пучка в диапазоне 100 мм с минимальным радиусом 62 мм. Указанный диапазон может быть смещен в сторону увеличения на 40 мм переустановкой кронштейна детектора. В этом случае допустимая разориентация образца не должна превышать $6,5^\circ$.

Дифрактометр ДСО-2П позволяет сортировать пластины по величине разориентации с погрешностью $2'$, контролировать качество кристаллов по КДО, а также проводить прецизионные измерения параметров решетки монокристаллов как с использованием внешнего эталона по положению детектора, так и по разности угловых положений трубки при отражении на малом и большом брэгговских углах. Этот метод для компланарной дифракции был предложен в статье [14] и развит в работах [15, 16]. Если монокроматор обеспечивает бездисперсионную (или почти бездисперсионную) схему на малом угле дифракции, то точность определения углового положения рефлекса существенно возрастает по сравнению с однокристалльным методом. Дисперсия для второго отра-

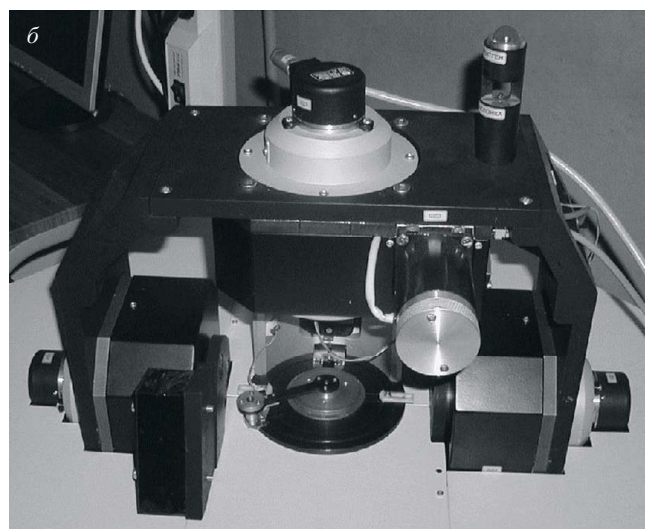
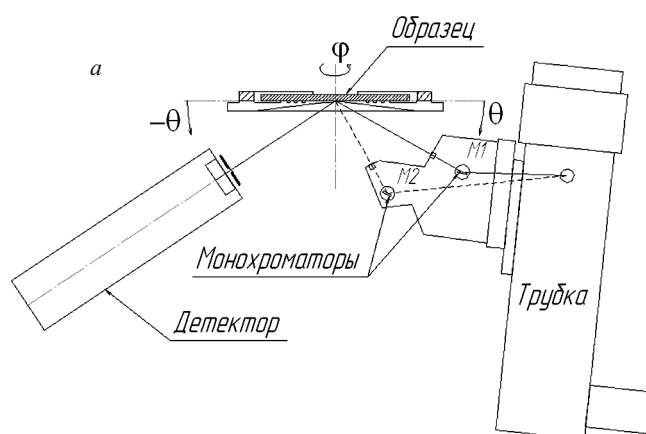


Рис. 5. Рентгенооптическая схема (а) и внешний вид (б) рентгеновского дифрактометра ДСО-2П

жения влияет незначительно, если угол ϑ_2 находится в районе $70 - 80^\circ$, где имеет место высокая чувствительность к изменению параметра решетки. Когда оба отражения выведены на одну плоскость дифракции (компланарная дифракция), уравнение связи разности угловых положений рефлексов $\Delta\omega$ с параметром решетки a для одной длины волны λ в случае кубической решетки имеет вид

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = \psi - \Delta\omega,$$

Результаты картирования образца кремния на сапфире

FWHM	$R_{\max}$	$R_i \cdot 10^7$	$I_{\max}$	A_{sym}	ϑ	I_{BG}	Sm_Diag
0,47460	0,05	82,79	169,6	0,9	34,5929	1	KNS7_L_1P_1_1-S
0,44380	0,04	82,64	160,6	0,99	34,6256	1,3	KNS7_L_1P1_1-S
0,38710	0,06	105,06	207,7	1,07	34,5742	2	KNS7_L0P_1_1-S
0,38190	0,05	101,18	200,7	1,14	34,6016	0,3	KNS7_L0P0_1-S
0,45230	0,04	76,34	158,2	0,96	34,6259	1,7	KNS7_L0P1_1-S
0,36240	0,06	114,11	223,5	0,85	34,5368	0,8	KNS7_L1P_1_1-S
0,37430	0,06	108,93	209,2	0,96	34,5847	1,8	KNS7_L1P1_1-S

Примечание. FWHM — полуширина КДО, град.; $R_{\max}$ — коэффициент отражения в максимуме; R_i — интегральный коэффициент отражения; $I_{\max}$ — интенсивность в максимуме, имп/с; A_{sym} — коэффициент асимметрии; ϑ — брэгговский угол, град.; I_{BG} — интенсивность фона, имп/с; Sm_Diag — имя файла КДО.

а после преобразования

$$\frac{\lambda\sqrt{m_2^2}}{a^2}\sqrt{a^2-\lambda^2m_1^2}-\frac{\lambda\sqrt{m_1^2}}{a^2}\sqrt{a^2-\lambda^2m_2^2}=\sin(\psi-\Delta\omega), \quad (2)$$

где $m_i^2 = h_i^2 + k_i^2 + l_i^2$.

Здесь ψ — угол между плоскостями $h_1k_1l_1$ и $h_2k_2l_2$, а разность брэгговских углов ϑ равна разности измеренных угловых положений трубки относительно неподвижного образца. При этом детектор с широкой щелью должен устанавливаться последовательно в положения около $2\vartheta_1$ и $2\vartheta_2$. Вычисление параметра решетки по экспериментальному значению разности углов $\Delta\omega$ осуществляется численным методом.

В случае некомпланарной дифракции, когда требуется последовательное выведение первого и второго отражений в плоскость дифракции $\vartheta - \varphi$ вращением, дополнительно необходимо получение отражений от тех же плоскостей, но с поворотом образца на 180° по азимутальному углу φ . В этом случае уравнение связи измеренных и брэгговских углов будет иметь вид

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{\omega_0'' + \omega_{180}'' - \omega_0' - \omega_{180}'}{2},$$

а после преобразования

$$\begin{aligned} \frac{\lambda\sqrt{m_2^2}}{a^2}\sqrt{a^2-\lambda^2m_1^2}-\frac{\lambda\sqrt{m_1^2}}{a^2}\sqrt{a^2-\lambda^2m_2^2} = \\ = \sin\left(\frac{\omega_0'' + \omega_{180}'' - \omega_0' - \omega_{180}'}{2}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь измеренные углы ω обозначены одним штрихом для одного отражения и двумя штрихами — для другого. Индексы 0 и 180 означают положение образца по азимутальному углу φ . Такая съемка позволяет исключить отклонение ε_0 отражающей плоскости от плоскости азимутального вращения, а разность сумм измеренных углов — неточное определение нулевого положения рентгеновской трубки. В то же время, значения измеренных углов ω_M должны быть скорректированы поправкой на преломление [17].

$$\omega = \arcsin\left\{\sin\frac{\omega_M}{1-\delta}\left[1-\frac{\delta\cos^2\varepsilon_0}{\sin(\omega_M+\varepsilon_0)\sin(\omega_M-\varepsilon_0)}\right]\right\}. \quad (4)$$

Здесь

$$\delta = 4,48 \cdot 10^{-6} n_0 \lambda_A^2 \quad (5)$$

единичный декремент преломления (n_0 — количество электронов в $1 \text{ \AA}^3$ вещества; λ_A — длина волны в $\text{\AA}$). Параметр a из уравнения (3) определяется численным методом.

Данный метод применим и для кристаллов некубических сингоний, если использовать систему уравнений для трех и более отражений. Точность измеренных углов в данном методе определяется точностными характеристиками привода трубки и точностью выведения рефлексов в экваториальную плоскость дифрак-

тометра. Она может быть повышена установкой прецизионного углового датчика непосредственно на ось привода трубки. Вместо базовых угловых датчиков ЛИР-158 могут быть установлены угловые датчики типа ЛИР-190А. Их дискретность достигает $0,0001^\circ$, а класс точности $3 (\pm 2,5'')$. Векторы дифракции монохроматоров должны быть максимально точно выведены в экваториальную плоскость дифрактометра в процессе изготовления и наладки прибора. Оставшееся небольшое отклонение t_{mon} определяется при пусконаладке съемкой ряда КДО с различными наклонами вектора дифракции образца. Оптимальным является тот наклон, при котором ширина КДО минимальна. Наклон вектора дифракции образца реализуется его азимутальным поворотом при наличии отклонения ε_0 отражающей плоскости от плоскости азимутального вращения. Зависимость наклона вектора дифракции образца от азимутального угла φ имеет вид

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\varphi + \varphi_0), \quad (6)$$

где φ_0 — сдвиг максимального наклона относительно начала шкалы. Этот угол определяется при поиске отражения. Для выведения образца в положение параллельности его вектора дифракции с вектором дифракции монохроматора нужно решить уравнение (5) относительно φ :

$$t_{mon} = \varepsilon_0 \cos(\varphi + \varphi_0). \quad (7)$$

В работах [14–16] отмечается, что величина $\Delta\omega$ должна быть меньше 1° , что необходимо для автоматической регистрации КДО. На современных автоматических дифрактометрах с прецизионным приводом, в частности на ДСО-2П, данное требование можно считать устаревшим.

Прецизионное измерение параметров решетки было опробовано как на пластинчатых кристаллах 3C-SiC, так и на субмиллиметровых обломках 3C-SiC, облученных нейтронами [18]. Указанные субмиллиметровые кристаллы используются в качестве индикаторов максимальной температуры кристаллических (ИМТК) для контроля нагреваемых подвижных частей различных двигателей. В дифрактометре применялась трубка с железным анодом. В качестве второго монохроматора использовался кремний с отражением 400 [$\vartheta(\text{FeK}\alpha) = 45,52^\circ$]. Для карбида кремния были выбраны отражения 311 [$\vartheta(\text{FeK}\alpha) = 47,42^\circ$] и 420 [$\vartheta(\text{FeK}\alpha) = 83,14^\circ$]. Здесь указаны углы дифракции для необлученного кристалла. При облучении кристалла нейтронами параметр решетки увеличивается и соответственно уменьшаются углы дифракции для отражений. Максимальное увеличение объема элементарной ячейки 3C-SiC составляет 3–3,7 %. На горячих элементах мотора происходят отжиг кристаллов и постепенный возврат к исходному размеру элементарной ячейки. Отражение 311 для 3C-SiC было выбрано из тех соображений, что минимальный угол между нормальными $\langle 311 \rangle$ составляет $35,1^\circ$, т.е. меньше, чем брэгговский угол. Это означает, что от-

ражение 311 надежно регистрируется в брэгговской геометрии относительно плоскости азимутального вращения образца. Это же справедливо и для отражения 420, для которого минимальный угол между нормалью составляет $36,87^\circ$. Следует отметить, что направление [111] равноудалено от всех векторов $\langle 420 \rangle$ на угол $39,23^\circ$, что следует учитывать при ω – ϕ сканировании во время поиска отражения произвольно установленного образца.

Все методы измерений на дифрактометрах производства ИТЦ «Радикон» реализуются с помощью собственного программного обеспечения на базе пакета RDPW, включающего встроенный редактор макросов.

Таким образом, на двухкristальном рентгеновском дифрактометре ДСО-1Т реализована трехосевая схема измерений. В качестве анализатора использована щель перед детектором с изменяемой угловой апертурой. Сканирование осуществляется перемещением детектора со щелью, что позволяет снимать карты обратного пространства вокруг выбранного узла обратной решетки образца.

От образцов GaAs/Si зарегистрированы карты распределения интенсивности рентгеновских лучей в обратном пространстве вблизи узла обратной решетки (004). Получены также карты в угловых координатах $\Delta\omega$ и $\Delta\theta$.

Для кристаллических решеток пленок GaAs, полученных разными способами зарождения первого монослоя, зарегистрирован разнонаправленный поворот относительно решетки подложки Si.

Модернизация гониометра и приставка ПДП превращают дифрактометр ДРОН-3 в дифрактометр высокого разрешения, позволяющий картировать монокристаллические пластины диаметром до 200 мм по характеристикам двухкristальных кривых дифракционного отражения.

Вертикальный двухкristальный $\theta - \theta - \phi$ дифрактометр ДСО-2П с двумя встроенными монохроматорами позволяет сортировать монокристаллические пластины по углу разориентации с погрешностью $2'$, контролировать структурную дефектность кристаллов по кривым дифракционного отражения, а также проводить прецизионные измерения параметров решетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korneev V. N., Ariskin N. I., Aulchenko V. M., et al. The Station DICS1 at KCSP "Siberia-2" for Time-Resolved Investigation of Dynamic Structure / *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2004. № 10. С. 24 – 27.
2. Корнеев В. Н., Шлектарев В. А., Забелин А. В. и др. Новая версия малоугловой рентгеновской аппаратуры на станции ДИКСИ в КЦСИ и НТ / *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2008. № 12. С. 61 – 68.
3. Артемьев А. Н., Беляев А. Д., Артемьев Н. А. и др. Дифракция Дебая – Шеррера в геометрии «обратного» рассеяния на Курчатовском источнике СИ / *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2013. № 10. С. 3 – 8.
4. Щербачев К. Д. D8 Discover — инструмент исследования перспективных материалов для микро- и нанoeлектроники / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2008. № 5. С. 40 – 44.
5. <http://www.radicon.spb.ru>, дата обращения 23.12.2013.
6. Василенко А. П., Лошкарев И. Д., Разумовский А. Ю. и др. Автоматический двухкristальный рентгеновский дифрактометр ДСО-1Т / *Материалы второй международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных»*. Великий Новгород. 2008. С. 76 – 78.
7. Лошкарев И. Д., Василенко А. П., Труханов Е. М. Разработка программного обеспечения автоматизированной системы управления рентгеновским трехосевым дифрактометром / *Материалы второй международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных»*. Великий Новгород. 2008. С. 113 – 115.
8. Разумовский А. Ю., Чернов М. А., Василенко А. П. и др. Аппаратное обеспечение рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения / *Материалы шестого международного научного семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики»*. Великий Новгород. 2013. С. 114 – 116.
9. Ломов А. А., Осипов А. Ф., Сироченко В. П. Методика исследования приповерхностных слоев монокристаллов кремния методом трехкristальной рентгеновской дифрактометрии / *Заводская лаборатория*. 1993. Т. 69. № 2. С. 41 – 43.
10. Щербачев К. Д., Курипятник А. В., Бублик В. Т. Применение трехкristальной рентгеновской дифрактометрии для исследования ионоимплантированных слоев / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2003. Т. 69. № 6. С. 23 – 31.
11. Емельянов Е. А., Коханенко А. П., Пчеляков О. П. и др. Морфология поверхности и кристаллографические свойства пленок GaAs, выращенных методом МЛЭ на вичинальных подложках Si(001) / *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 1. С. 49 – 54.
12. Лошкарев И. Д., Василенко А. П., Труханов Е. М. и др. Зависимость пластической релаксации пленок GaAs от способа зарождения первого монослоя As на Si(001) / *Известия РАН, серия физическая*. 2013. Т. 77. № 3. С. 264 – 267.
13. Музыков П. Г., Разумовский А. Ю., Сударшан Т. С., Чернов М. А. Влияние некомпланарности векторов дифракции на характеристики двухкristальных кривых качания / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2003. Т. 69. № 12. С. 24 – 28.
14. Isomae S., Kishino S., Takagi K., et al. Lattice-parameter measurement technique for single crystals using two lattice planes, and its application to $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ single crystals / *J. Appl. Cryst.* 1976. Vol. 9. P. 342 – 346.
15. Лидер В. В. Использование компланарных рентгеновских рефлексов для прецизионного определения параметров кристаллической решетки / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2008. Т. 74. № 9. С. 31 – 35.
16. Лидер В. В. Использование нескольких компланарных рефлексов для прецизионного определения параметра кристаллической решетки / *Кристаллография*. 1994. Т. 39. № 3. С. 406 – 409.
17. Лисойван В. И. Измерения параметров элементарной ячейки на однокristальном спектрометре. — Новосибирск: Наука, СО, 1982. — 126 с.
18. Николаенко В. А., Карпунин В. И. Измерение температуры с помощью облученных материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 120 с.