

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ С КОНДЕНСИРОВАННЫМ ВЕЩЕСТВОМ

PACSnumbers: 07.85.Fv, 41.50.+h, 61.05.cf, 61.05.cm, 61.05.cp, 68.35.Fx, 78.67.Pt, 81.15.Cd

Структурные и рентгено-оптические характеристики многослойных рентгеновских зеркал W/Si

Ю. П. Першин, А. Ю. Девизенко, В. В. Кондратенко, Н. Modrow*,
Ф.-Ж. Hormes**

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21,
61002 Харьков, Украина*

**Physikalisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn,
12 Nußallee,
D-53115 Bundesrepublik, Deutschland*

***Canadian Light Source, University of Saskatchewan,
101 Premeter Road,
SK S7N0X4 Saskatoon, Canada*

Методами рентгеновской дифракции в жёстком ($\lambda = 0,154$ нм) и мягком ($0,8 < \lambda < 2,4$ нм) диапазонах исследована структура и оптические свойства серии многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) W/Si с систематически изменяющимся периодом в диапазоне 1–6 нм, изготовленных методом магнетронного распыления. Наличие перемешанных прослоек на межфазных границах с составом WSi_2 оказывает основное влияние на снижение отражательной способности МРЗ в мягкой рентгеновской области.

Corresponding author: Yurii Pavlovich Pershin
E-mail: persh@kpi.kharkov.ua

*National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute',
21 Frunze Ave., 61002 Kharkiv, Ukraine*

**Physikalisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn,
12 Nußallee, D-53115 Bundesrepublik, Deutschland*

***Canadian Light Source, University of Saskatchewan,
101 Premeter Road, SK S7N0X4 Saskatoon, Canada*

Please cite this article as: Yu. P. Pershin, A. Yu. Devizenko, V. V. Kondratenko, N. Modrow, and F.-J. Hormes, Structural and X-Ray–Optical Characteristics of the W/Si Multilayer X-Ray Mirrors, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 3: 367–388 (2016) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.38.03.0367.

Показана возможность изготовления многослойного зеркала с разрешающей способностью на длине волны 2,36 нм, по меньшей мере, в 5 раз выше, чем у стандартных зеркал W/Si.

Ключевые слова: многослойное рентгеновское зеркало, мягкое рентгеновское излучение, отражательная способность, разрешающая способность, межфазное взаимодействие, силицид.

Методами рентгеновської дифракції в жорсткому ($\lambda = 0,154$ нм) та м'якому ($0,8 < \lambda < 2,4$ нм) діапазонах досліджено структуру та оптичні властивості серії багатослойних рентгеновських дзеркал (БРД) W/Si, виготовлених методом магнетронного розпорощення, у яких систематично змінюється період у діапазоні 1–6 нм. Присутність на міжфазних межах змішаних прошарків силіциду WSi_2 спричиняє найбільший вплив на зменшення коефіцієнту відбивання БРД в м'якій рентгеновській області ($\lambda = 2,36$ нм). Показано можливість виготовлення багатослойного дзеркала з оптичною роздільною здатністю у м'якому рентгеновському діапазоні щонайменше у 5 разів вище, аніж у стандартних дзеркал W/Si.

Ключові слова: багатослойне рентгеновське дзеркало, м'яке рентгеновське випромінювання, відбивна здатність, роздільна здатність, міжфазна взаємодія, силіцид.

By methods of X-ray diffraction in hard ($\lambda = 0.154$ nm) and soft ($0.8 < \lambda < 2.4$ nm) ranges, the structure and optical properties for series of W/Si multilayer X-ray mirrors (MXMs) with periods of 1–6 nm are studied. MXMs are deposited with DC magnetron sputtering. Mixed interlayers at MXM interfaces with composition close to WSi_2 make the main contribution to a reduction of MXM reflectivity at soft X-rays ($\lambda = 2.36$ nm). A possibility to fabricate MXMs with resolution of at least 5 times better than standard W/Si MXM in the soft X-ray range is demonstrated.

Key words: multilayer X-ray mirror, soft X-rays, reflectivity, resolution, interface interaction, silicide.

(Получено 13 января 2016 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность управлять рентгено-оптическими характеристиками многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) (например, распределением коэффициента отражения по углам, $R(\theta)$, либо распределением коэффициента отражения в зависимости от длины волны $R(\lambda)$ и др.) является их уникальным свойством вследствие достаточно широкого выбора материалов для составляющих слоёв, а также возможности регулировки толщины каждого индивидуального слоя с точностью до сотых долей нанометра. Среди наиболее часто востребованных характеристик МРЗ — высокая отражательная способность.

Многослойные рентгеновские зеркала W/Si получили достаточно широкое распространение в различных областях науки и техники (материаловедение [1, 2], астрофизика [3], рентгеновская оптика: монокроматоры [4–6], суперзеркала [7–9], дифракционные решётки [10–14], зонные пластинки [15–19], телескопы [20–24] и т.д.), именно благодаря высокой отражательной способности в широком диапазоне длин волн ($0,1 < \lambda < 3,1$ нм). Они стабильны как при комнатной температуре, так и при нагреве ($T < 300^\circ\text{C}$) [25], в результате чего они потеснили органические кристаллы в рентгеновской спектроскопии [1, 4]. Кроме того, радиационная стойкость этих зеркал сделала их основным рентгено-оптическим элементом в синхротронах в качестве первого зеркала, принимающего на себя основную нагрузку сплошного спектра [26–29].

Несмотря на успехи в технологии изготовления МРЗ W/Si, сохраняется неопределённость в отношении описания некоторых параметров их структуры, в частности структуры межфазных границ. «Дефектность» межфазных границ вносит основной вклад в снижение отражательной способности МРЗ W/Si. С одной стороны границы имеют шероховатости, т.е. неровности поверхности, а с другой — перемешанные прослойки. Эти два параметра трудно разделить, поскольку их влияние на отражательную способность зеркал очень близко. Состав и размеры прослоек остаются «крепким орешком» даже для современного аналитического оборудования и современных методов исследования, поскольку в большинстве случаев МРЗ W/Si имеют аморфную структуру при толщине отдельных слоёв ≈ 3 нм и менее. Мнения о состоянии перемешанных прослоек в литературе противоречивы, а их толщины приводятся со значительным разбросом (0,6–1,3 нм). Крайними вариантами для описания состояния структуры прослоек являются: механическая смесь [30] и аморфный силицид, состав которого в различных литературных источниках определяется как дисилицид WSi_2 [31] либо просто как W_xSi_y [32].

В данной работе мы использовали рентгеновские методы исследования как в жесткой ($\lambda = 0,154$ нм), так и в мягкой (0,8–2,4 нм) рентгеновской областях, чтобы оценить состав и толщину перемешанных прослоек в аморфных МРЗ W/Si, а также продемонстрировать возможность использования полученных результатов для управления рентгено-оптическими свойствами многослойных зеркал.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Многослойные зеркала изготавливали методом прямого магнетронного распыления. В течение каждого эксперимента токи на обоих магнетронах и давление аргона (0,36 Па) поддерживались постоянными, что обеспечивало постоянство параметров осаждения. Скорости осаждения для вольфрама и кремния были равны

$\cong 0,148$ нм/с и $\cong 0,424$ нм/с соответственно.

В качестве мишеней использовались пластины вольфрама и кремния диаметром $\cong 100$ мм и чистотой 99,5% (W) и 99,99% (Si). Мишень кремния представляла собой монокристаллическую шайбу (111)Si. Исходное давление в вакуумной камере для осаждения МРЗ составляло не более $4 \cdot 10^{-4}$ Па.

Многослойные покрытия осаждали на подложки из кремния и сверхгладкого стекла с шероховатостью поверхности 0,3–0,5 нм. В процессе изготовления каждый слой был осаждён так, что подложка находилась над каждым из магнетронов фиксированное время. Номинальные соотношения толщин слоёв для образцов, изготовленных в разных экспериментах (т.е. в образцах с различными периодами), были одинаковыми.

Образцы аттестовались на малоугловом рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, собранном по схеме с использованием графитового кристалла-монокроматора для монохроматизации дифрагированного пучка. В сочетании со щелью шириной 0,25 мм это позволяло выделять только CuK_α -линию ($\lambda = 0,154178$ нм) из спектра, создаваемого рентгеновской трубкой с медным анодом.

Рентгено-оптические характеристики МРЗ W/Si были получены с помощью рентгеновского спектрометра РСМ-500 с вакуумной камерой-приставкой для измерения отражательной способности зеркал. Для получения излучения кислородной линии (OK_α) в качестве анода использовалась медная пластина, покрытая слоем Al_2O_3 в виде отдельных островков. Режим работы рентгеновской трубки: напряжение 3,5 кВ, ток 50 мА. В качестве диспергирующего элемента использовалась вогнутая сферическая дифракционная решетка (радиус кривизны $r = 1995$ мм, 600 штрихов на миллиметр), а для фильтрации коротковолнового излучения — вогнутое сферическое зеркало ($r = 4000$ мм); оба этих оптических элемента работают на эффекте полного внешнего отражения. Входная и выходная щели дифракционной решетки — 100 мкм. Щель перед счетчиком имела ширину 1,5 мм. Расходимость падающего на образец пучка $\pm 0,75^\circ$. В качестве счетчика использовался ВЭУ-6 с фотокатодом из CsI.

Измерения разрешающей способности многослойных образцов были проведены на лучевой линии электронного синхротронного кольца ELSA Физического института при Боннском университете с энергией электронов в кольце 2,3 ГэВ и токе 15 мА. Между камерой кольца и измерительным отсеком располагалась бериллиевая фольга ($\cong 100$ мкм), которая отсекала длинноволновую часть излучения, а также изолировала отсек от вакуумной части кольца. Излучение монохроматизировалось при помощи органического кристалла КАР (кислый фталат калия $\text{C}_8\text{H}_5\text{O}_4\text{K}$). В качестве детектора использовалась ионизационная камера. Предварительно усиленный ток в ионизационной камере оцифровывался и передавался в компьютер-

ную систему. Интенсивность монохроматизированного излучения составляла $\cong 10^9$ фотон/с при средней спектральной ширине $\cong 1$ эВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мы изготовили серию МРЗ W/Si с периодами, последовательно изменяющимися в пределах от $\cong 1$ до $\cong 6$ нм. Число периодов выбиралось таким образом, чтобы общая толщина многослойного покрытия для всех образцов была приблизительно одинакова и составляла $\cong 200$ нм. Мы стремились к тому, чтобы изготовленные образцы имели рентгено-оптические характеристики, близкие к используемым практически. Соотношение слоёв было таким, чтобы получить высокие коэффициенты отражения в мягкой рентгеновской области (главным образом на длине волны кислородной линии OK_α , $\lambda = 2,36$ нм) для образцов с периодами $d \cong 3$ нм.

3.1. Малоугловая рентгеновская съёмка ($\lambda = 0,154$ нм)

Изготовленные МРЗ были отсняты в жестком рентгеновском излучении ($\lambda = 0,154$ нм) при малых углах ($2\theta < 21^\circ$). По картинам малоугловой дифракции были измерены периоды, коэффициенты отражения дифракционных максимумов и критические углы. Примеры двух дифрактограмм приведены на рис. 1. Здесь показаны дифрактограммы образцов с периодами $d \cong 2,2$ нм (рис. 1, а) и $d \cong 6,3$ нм (рис. 1, б). Для всех образцов, за исключением образца с наименьшим периодом ($d \cong 1$ нм), наблюдается, по меньшей мере, два пика отражения. Последние из наблюдаемых дифракционных пиков для различных МРЗ W/Si располагаются в диапазоне углов $14,5\text{--}16,9^\circ$, что с одной стороны указывает на хорошую периодичность, а с другой стороны — на низкую шероховатость (σ), которая в соответствии с [33] составляет $0,26\text{--}0,31$ нм. Обращаем внимание на то, что наблюдаемые шероховатости меньше шероховатостей используемых подложек, на которые наносились многослойные покрытия, т.е. в данной системе происходит сглаживание поверхностных неровностей, что присуще аморфным системам вообще [34], и МРЗ на основе кремния в частности [35, 36].

На дифракционных картинах для некоторых образцов наблюдается «погасание» отдельных пиков. Например, на приведённых рефлектограммах (рис. 1) можно наблюдать такую ситуацию, когда один из последующих пиков интенсивнее предыдущего. Так для многослойного образца с $d \cong 2,2$ нм (рис. 1, а) «гаснет» 2-й максимум ($R_3/R_2 \cong 2$), а для образца с $d \cong 6,3$ нм (рис. 1, б) — 3-й максимум ($R_4/R_3 \cong 5$). Погасание указывает на то, что в этих образцах доля сильно поглощающего слоя в периоде близка к $0,5$ и $0,33$ соответ-

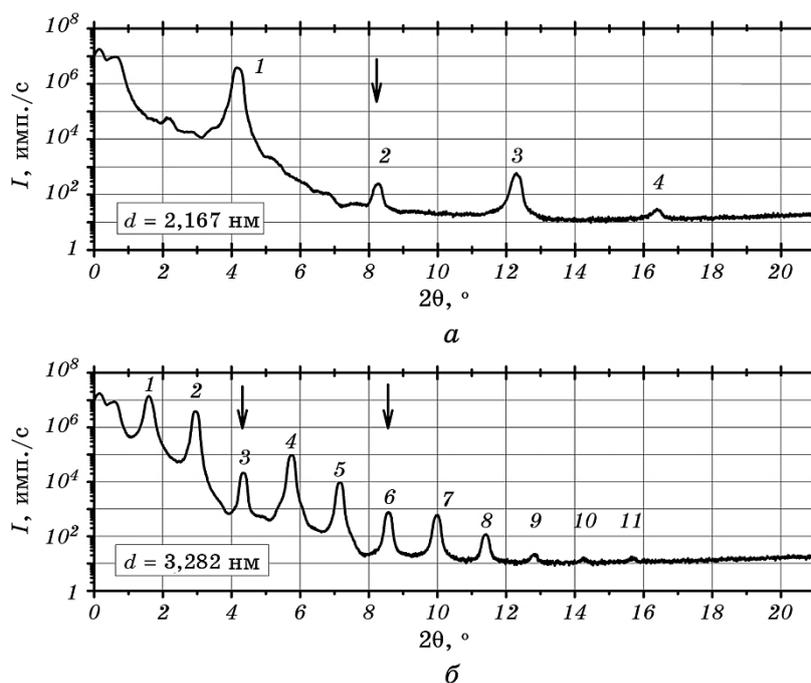


Рис. 1. Малоугловые рефлектограммы ($\lambda = 0,154$ нм) для многослойных рентгеновских зеркал W/Si с периодами $\cong 2,2$ нм (а) и $\cong 6,3$ нм (б). На рефлектограммах числами пронумерованы дифракционные пики. «Погасшие» пики отмечены стрелками.

Fig. 1. Small-angle reflectograms ($\lambda = 0.154$ nm) for W/Si multilayer X-ray mirrors with periods of $\cong 2.2$ nm (a) and $\cong 6.3$ nm (b). Diffraction maxima are numbered by numerals. Suppressed maxima are marked with arrows.

ственно. Это также свидетельствует об изменении соотношения толщин слоёв в периоде от образца к образцу. Такое изменение для образцов с различными периодами может свидетельствовать о взаимодействии слоёв в системе W–Si, сопровождающемся объёмными изменениями.

Мы также измерили критические углы, θ_{CR} , на рефлектограммах для каждого МРЗ и рассчитали для них индексы показателя преломления, $\bar{\delta}$ ($= 1 - n$), по формуле $\bar{\delta} = \theta_{CR}^2/2$. Расчётные данные представлены на рис. 2 в графическом виде. Поскольку $\bar{\delta}$ определяет среднюю плотность многослойного покрытия, то из данной зависимости видно, что плотность МРЗ W/Si растёт с уменьшением периода. Этот рост составляет примерно 28%, что может быть связано с силицидообразованием, поскольку плотность продуктов реакции (силицидов) выше средней плотности исходных компонентов (W и Si), и ростом объёмной доли силицида в малопериодных МРЗ.

Индексы $\bar{\delta}$ для трёх наименьших периодов близки друг к другу, что указывает на насыщение взаимодействия W и Si в этих МРЗ, т.е. здесь можно ожидать полный расход слоя вольфрама. Падение $\bar{\delta}$ с ростом периода свидетельствует о частичном взаимодействии W и Si с увеличением толщины слоя W.

Известно, что в системе W–Si возможно образование двух силицидов: WSi_2 и W_5Si_3 [37]. Табличные плотности для них составляют $9,857 \text{ г/см}^3$ и $14,523 \text{ г/см}^3$ соответственно. Образование обоих силицидов сопровождается объёмной усадкой, т.е. происходит уплотнение покрытия. Если полагать, что слои W и Si имеют табличные плотности ($19,263 \text{ г/см}^3$ и $2,332 \text{ г/см}^3$ соответственно), то максимальные увеличения плотности при образовании этих силицидов, как показывают результаты расчётов, приведённых в табл. 1, принимают значения 17,6% (W_5Si_3) и 27,6% (WSi_2). Сравнивая рассчитанные усадки с величиной изменения $\bar{\delta}$ (рис. 2), можно сделать вывод, что силицидообразование в системе W–Si может рассматриваться, как одна из основных причин роста средней плотности. Если судить по величине изменения плотности образцов с предельными периодами (рис. 2), то наиболее вероятным силицидом, образующимся в МРЗ W/Si при осаждении, является WSi_2 .

3.2. Оценка доли «металлического» слоя в периоде

Полагая, что все слои имеют табличные плотности, мы можем вычислить индексы $\bar{\delta}$ для каждого из входящих в состав МРЗ слоёв, и

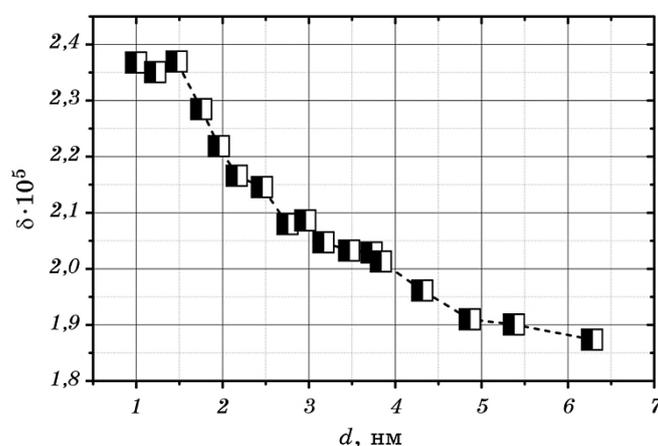


Рис. 2. Зависимость индекса, $\bar{\delta}$, показателя преломления $n (= 1 - \bar{\delta})$ от периода МРЗ W/Si.

Fig. 2. Dependence of the mean refractive index decrement, $\bar{\delta}$, on the period of W/Si multilayer X-ray mirrors.

ТАБЛИЦА 1. Мольные объёмы исходных компонентов и продуктов реакции, мольные объёмные усадки (ΔV), индекс показателя преломления (δ) для различных силицидов табличной плотности (ρ).

TABLE 1. Molar volumes of initial components and reaction products, volume contractions (ΔV), refractive index decrement (δ) for different silicides with tabulated densities.

№	Силицид (ρ , г/см ³)	Реакция, мольные объёмы, см ³	$-\Delta V$, см ³	$\Delta\rho$, %	$\delta \cdot 10^5$ (CuK α_1)
1	WSi ₂ (9,857)	W + 2Si = WSi ₂ 9,5442 + 24,0870 → 24,3503	9,281	27,6	2,5643
2	W ₅ Si ₃ (14,523)	5W + 3Si = W ₅ Si ₃ 47,7210 + 36,1306 → 69,0977	14,754	17,6	3,5933

по ним, используя индексы преломления $\bar{\delta}$ для каждого зеркала, оценить долю, β , сильнопоглощающего слоя в периоде. Так, для W, WSi₂ и Si по формуле [38]

$$\delta = 2,7 \cdot 10^{-6} \frac{\rho}{A} f_1 \lambda^2$$

(ρ — плотность вещества, A — атомная масса (или сумма атомных масс для вещества), f_1 — атомный фактор рассеяния [39] (или сумма атомных факторов рассеяния для вещества), λ — длина волны рентгеновского излучения) мы получили следующие индексы преломления для слоёв: $\delta_W = 4,629 \cdot 10^{-5}$, $\delta_{\text{WSi}_2} = 2,564 \cdot 10^{-5}$, $\delta_{\text{Si}} = 7,582 \cdot 10^{-6}$ (см. табл. 1). Теперь, зная все δ , мы можем определить искомую долю β . Для случая двухслойного приближения строения МРЗ доля β вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{\bar{\delta} - \delta_{\text{Si}}}{\delta_{\text{Me}} - \delta_{\text{Si}}},$$

где δ_{Me} — индекс показателя преломления для W или его силицида (например, WSi₂).

На рисунке 3 показаны доли W-содержащего слоя для случаев, когда «металлический» слой состоит либо только из W (звёздочки), либо из WSi₂ (квадратики), которые являются предельными случаями строения реального зеркала. Горизонтальная серая линия показывает номинальную долю $\beta_{\text{ном}} [= t_W / (t_W + t_{\text{Si}})]$. Очевидно, что при увеличении периода, когда слои W и Si перестают взаимодействовать, доля W-содержащего слоя, β_W , должна стремиться к номинальному значению. С другой стороны, при малых толщинах вольфрама может полностью взаимодействовать с кремнием с образованием дисилицида, и доля β_{WSi_2} должна заметно возрастать за счёт

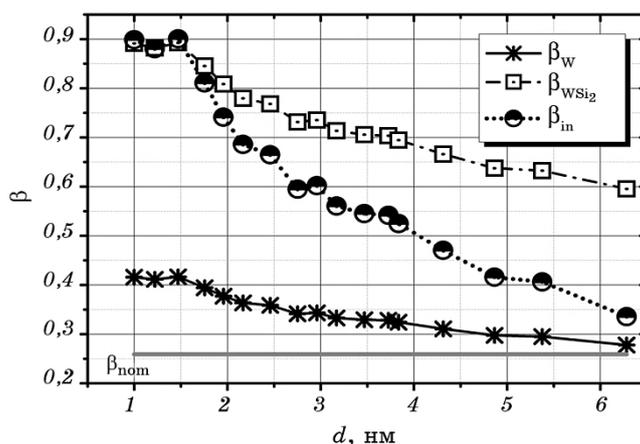


Рис. 3. Расчётные доли (β) вольфрама-содержащего слоя в периоде для случаев, когда «металлический» слой состоит только из W (звёздочки), WSi_2 (квадратики) и промежуточного состава (кружки).

Fig. 3. Estimated thickness ratio (β) of the W-containing layer to the multi-layer period for the cases when ‘metallic’ layer consists of tungsten only (stars), WSi_2 (squares) or intermediate composition (circles).

расхода слоя кремния. Другими словами начальный участок для β_{WSi_2} и конечный участок для β_W на рис. 3 могут быть близки к действительности. По крайней мере, можно ожидать, что реальная ситуация находится между этими двумя крайностями. Поскольку мы точно не знаем, какое количество W взаимодействует с кремнием в каждом случае, очень трудно определить настоящую долю W-содержащего слоя для конкретного зеркала. Однако нам может помочь тот факт, что номинальная доля, β_{nom} , осаждённых слоёв вольфрама и кремния была одинаковой для каждого из образцов. Тогда, опираясь на этот факт, можно показать, что, в конечном счёте, выполняется следующее равенство:

$$\frac{\beta - \beta_W}{\beta_{WSi_2} - \beta_W} = \frac{\bar{\delta} - \delta_W}{\delta_{WSi_2} - \delta_W},$$

где δ_W и β_W — соответственно средние индекс показателя преломления и доля вольфрама для МРЗ W/Si с номинальными значениями толщин слоёв, в которых отсутствует взаимодействие между W и Si, а δ_{WSi_2} и β_{WSi_2} — соответственно средние индекс показателя преломления и доля силицида вольфрама для МРЗ, в которых W и Si взаимодействуют полностью с образованием дисилицида. Тогда долю «металлического» слоя (β_{in}) можно определить по следующей формуле:

$$\beta_{in} = \beta_W + \frac{\bar{\delta} - \delta_W}{\delta_{W\text{Si}_2} - \delta_W} (\beta_{W\text{Si}_2} - \beta_W).$$

Значения долей β_{in} для промежуточного случая, когда слой W взаимодействует с кремнием частично, представлены в табл. 2 и на рис. 3 в виде кружков. Как видно из рисунка, в соответствии с нашими ожиданиями, начальные значения β_{in} совпадают с $\beta_{W\text{Si}_2}$, а конечные значения стремятся к β_{nom} , как и β_W . В таблице 2 также приведены ожидаемые толщины дисилицида ($t_{W\text{Si}_2}^T$), которые были посчитаны на основе полученных долей. Как можно видеть, толщины дисилицидов в различных образцах примерно равны и находятся в пределах $0,68 \pm 0,05$ нм. Это указывает на стабильность процесса силицидообразования в образцах с различными периодами, или, другими словами, с различной толщиной слоя вольфрама.

Возвращаясь к рис. 1, мы теперь можем сравнить полученные данные для β_{in} с предварительными оценками β в соответствии с пра-

ТАБЛИЦА 2. Экспериментальные (с индексом E) и расчётные (с индексом T) данные для структурных и рентгено-оптических характеристик МРЗ W/Si (период, d ; доля, β_{in} , W-содержащего слоя; толщина, t , слоя дисилицида на каждой межфазной границе; отражательная способность, R , в кислородной линии; ширина пика, $\Delta\theta$; разрешающая способность, $\text{tg}\theta/\Delta\theta$; отношение экспериментальной, R_E и теоретической, R_T , отражательных способностей; ожидаемая шероховатость, σ_T , межфазных границ).

TABLE 2. Experimental (indexed with 'E') and estimated (indexed with 'T') data for structural and X-ray optical characteristics of W/Si multilayers (d —periodicity; β_{in} —thickness ratio of W-containing layer to multilayer period; t —thickness of silicide layer at each interface; R —reflectivity at oxygen line; $\Delta\theta$ —full width at half maximum; $\text{tg}\theta/\Delta\theta$ —resolving power; R_E/R_T —ratio of experimental reflectivity to expected one; σ_T —expected RMS roughness at interfaces).

№	d_E , нм	β_{in}	$t_{W\text{Si}_2}^T$, нм	R_E , % (OK_α)	$\Delta\theta_E$, °	$\text{tg}\theta/\Delta\theta$ (E)	R_E/R_T
1	1,957	0,741	0,60	2,0	1,4	28	0,61
2	2,458	0,665	0,67	3,5	1,4	21	0,56
3	2,959	0,602	0,71	6,8	1,5	20	0,75
4	3,469	0,545	0,72	8,8	1,5	16	0,8
5	3,836	0,525	0,76	10,1	1,5	10	0,82
6	4,314	0,470	0,70	11,3	1,8	9	0,80
7	4,865	0,416	0,62	12,4	2,1	7	0,79
8	6,282	0,378	0,62	13,7	2,5	5	0,81

вилами погасания. Так, мы ожидали, что доля W-содержащего слоя в образце с самым большим периодом (6,282 нм) должна составлять около 0,33, и в нашем случае мы получили близкое значение $\approx 0,34$. Однако, для зеркала с промежуточным периодом (2,167 нм), где мы ожидали $\beta \approx 0,5$, из графика на рис. 3 мы имеем $\beta_{in} \approx 0,69$, т.е. наблюдается достаточно существенное различие. По нашему мнению, кроме наличия различных шероховатостей на разных межфазных границах в МРЗ, которые могут «скрадывать» эффект погасания, тонкие слои, составляющие зеркало, могут иметь плотности, отличные от табличных [40], что может приводить к завышению β_{in} . Уменьшение плотностей на 5–10% приводит только к росту β_{in} . Увеличение плотности W_{Si_2} улучшает ситуацию, однако это возможно только в том случае, когда атомы W при осаждении на слой кремния реагируют не полностью, образуя слой, состоящий либо из смеси W_{Si_2} и W, либо из смеси двух силицидов (W_{Si_2} и W_{Si_3}).

3.3. Измерения в мягкой рентгеновской области

3.3.1. Отражательная способность в излучении OK_α ($\lambda = 2,36$ нм)

Мы измерили отражательные способности некоторых МРЗ в излучении OK_α на установке, собранной на базе спектрометра РСМ-500. Пиковые коэффициенты отражения (R) этих зеркал представлены в табл. 2 и на рис. 4 (треугольники) как функция периода образцов. Максимальный коэффициент отражения для МРЗ с самым большим периодом ($d \approx 6,3$ нм) составляет $\approx 13,7\%$. Теоретический коэффициент отражения для этого зеркала с номинальными толщинами и идеально гладкими межфазными границами может достигать 21,3%. Если учесть влияние поверхностного окисленного слоя и шероховатостей $\sigma \approx 0,31$ нм, эта величина уменьшится до 17,8%. Расчётный коэффициент отражения совпадёт с экспериментальным, если на межфазные границы ввести дисилицидную прослойку толщиной минимум 1,3 нм при $\beta \approx 0,35$. Из приведённых цифр видно, что основную роль в снижении коэффициента отражения зеркала на кислородной линии могут играть силицидные прослойки. Причём их влияние будет тем больше, чем меньше период, поскольку с уменьшением периода содержание «чистого» вольфрама в периоде будет понижаться.

Как видно из рис. 4, коэффициенты отражения падают с уменьшением периода. Это связано с уменьшением среднего контраста оптических постоянных на границах раздела вследствие постепенного перехода системы от W/Si к W_{Si_2}/Si , как это было установлено выше. Кроме того, при небольших периодах уже сказывается влияние шероховатости на отражательную способность и тем больше, чем меньше период.

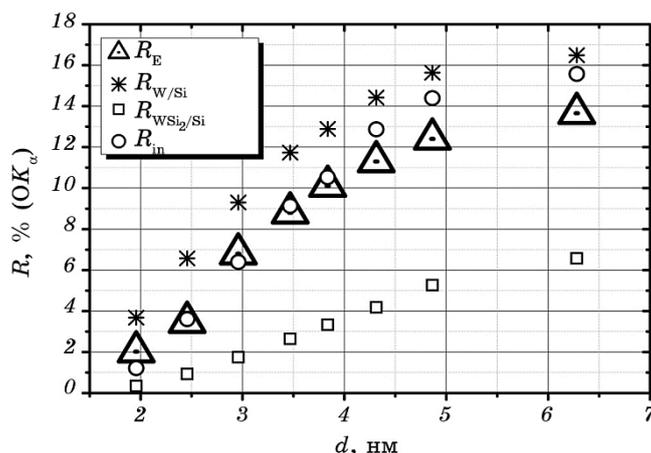


Рис. 4. Экспериментальная отражательная способность МРЗ W/Si (треугольники) в излучении OK_α в зависимости от периода. Ожидаемые коэффициенты отражения, которые рассчитаны для многослойной системы, состоящей из слоёв W и Si (звездочки), WSi_2 и Si (квадратики) и из слоёв промежуточного состава (W + WSi_2 и Si) (кружки).

Fig. 4. Experimental reflectivities of W/Si multilayers (triangles) at OK_α -radiation versus multilayer periodicity. Expected reflection coefficients are calculated for a multilayer system consisting of W and Si layers (stars), WSi_2 and Si (squares), and layers of the intermediate composition (W + WSi_2 and Si) (circles).

Мы также сделали оценку коэффициентов отражения этих же МРЗ в кислородной линии на основе долей β , полученных в предыдущем подразделе. В расчётах мы использовали двухслойную либо четырёхслойную модель строения МРЗ, вводя межфазные прослойки дисилицидного состава одинаковой толщины на обе межфазные границы там, где это необходимо. Мы брали одинаковые шероховатости 0,31 нм для всех межфазных границ, которые являются максимальными для данной многослойной системы. Как видно из рис. 4, являющегося графическим представлением результатов расчётов, экспериментальные значения лежат в промежутке между двумя предельными случаями для МРЗ WSi_2/Si и W/Si. Использование β_{in} и четырёхслойной модели существенно улучшает ситуацию: большинство R_{in} близки к эксперименту (R_E). Более низкое значение R_E для образца с наименьшим периодом по сравнению с R_{in} может быть связано с большей геометрической расходимостью падающего пучка по сравнению шириной пика самого образца. В этом случае образец работает как коллиматор, обрезая часть падающего пучка.

Заметна также тенденция приближения значений R_{in} к $R_{W/Si}$ с заметным отходом R_{in} от экспериментальных значений R_E для по-

следних трёх точек в МРЗ с большими периодами. В настоящее время мы не можем однозначно указать на причину этого отклонения. Возможно, плотности слоёв отличаются от табличных значений; в МРЗ образуется силицид W_5Si_3 , например, на межфазных границах Si-на-W; присутствуют примеси и загрязнения на поверхности и т.д. Все это может дополнительно понижать отражательную способность МРЗ. Для дальнейшего прояснения этого обстоятельства необходимо провести дополнительные исследования, чтобы сузить набор возможных влияний.

Ширина пиков для образцов с периодами $d \cong 3$ нм, описанных в литературе, по крайней мере, вдвое меньше [1, 2, 41] аналогичных величин для образцов, полученных в данной работе. Мы полагаем, что это связано с инструментальным уширением, привносимым измерительным оборудованием. Хотя полученные коэффициенты отражения для этих образцов близки к нашим более ранним измерениям (6–9%) на другом спектрометре с меньшей расходимостью пучка, совпадение ширины пиков с расходимостью пучка спектрометра указывает на возможное занижение R для всех образцов, за исключением последних трёх, у которых $\Delta\theta > 1,5^\circ$ (см. табл. 2).

3.3.2. Измерения на синхротроне

Известно, что МРЗ имеют, по меньшей мере, на порядок выше коэффициенты отражения в мягкой рентгеновской области ($\lambda = 0,3–7,0$ нм) по сравнению с неорганическими и органическими кристаллами [38] и практически полностью заменили плёнки Лэнгмюра–Блоджетт. Однако их разрешающая способность оставляет желать лучшего. Мы воспользовались результатами наших исследований, чтобы изготовить МРЗ W/Si с повышенным разрешением. Для этого мы:

- 1) использовали 2-й порядок отражения, чтобы уйти от высоких отражательных способностей ($R > 10\%$), где работают динамические эффекты, ограничивающие глубину проникновения рентгеновских лучей;
- 2) уменьшили толщину вольфрама, чтобы понизить поглощение W-содержащего слоя и соответственно повысить глубину проникновения рентгеновских лучей;
- 3) нанесли относительно небольшое число слоёв, чтобы дрейф скоростей осаждения, например, за счёт эрозии мишеней, был минимальным;
- 4) повысили равномерность покрытия по поверхности подложки за счёт непрерывного движения подложки над магнетронами при изготовлении МРЗ.

Мы ожидаем, что в результате взаимодействия тонкого слоя W и слоя Si сформируется многослойное покрытие WSi_2/Si . Поскольку

усадка при образовании WSi_2 почти в точности равна толщине осажденного слоя вольфрама; дополнительным достоинством такого МРЗ является независимость периода от толщины напылённого слоя вольфрама, что даёт дополнительные преимущества в технологии изготовления.

Мы нанесли 185 пар слоёв W и Si так, чтобы получить МРЗ WSi_2/Si с номинальным периодом $d \cong 2,66$ нм и номинальной долей $\beta_{\text{WSi}_2} \cong 0,12$. Малоугловая рефлектограмма в жёсткой рентгеновской области ($\lambda = 0,154$ нм) для изготовленного образца представлена на рис. 5. На рефлектограмме наблюдаются четыре узких дифракционных максимума. Коэффициенты отражения (R) для первых двух максимумов составляют $R_1 \cong 35\%$ и $R_2 \cong 2\%$. Несмотря на взаимодействие слоёв при осаждении, наблюдаются достаточно низкие межфазные шероховатости: 0,33 нм (WSi_2 -на-Si) и 0,37 нм (Si-на- WSi_2). Наличие межпиковых особенностей связано с существованием окислённого слоя на поверхности МРЗ.

Подгоночная кривая хорошо совпадает с экспериментальной для МРЗ WSi_2/Si со следующими подгоночными параметрами: период $d \cong 2,8$ нм, $\beta_{\text{WSi}_2} = 0,142$ и табличными плотностями слоёв. Однако, подгоночные значения периода и доли не совсем точно совпадают с номинальными значениями. С одной стороны, это может быть связано с изменением условий осаждения МРЗ: мы определяли скорости осаждения компонентов на неподвижную подложку, а осаждали слои на движущуюся. По этой же причине могут повышаться

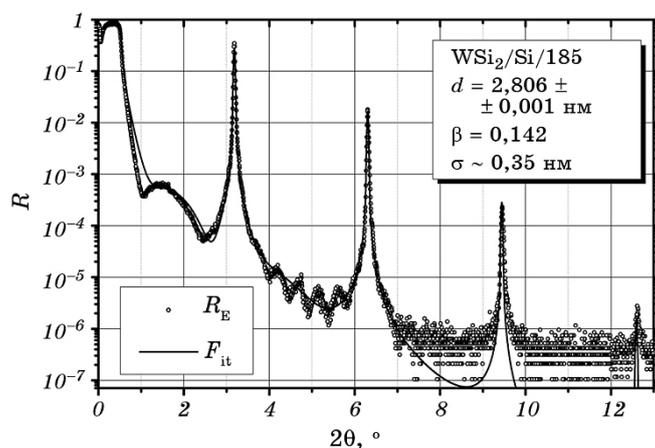


Рис. 5. Малоугловая рентгеновская рефлектограмма (кружки) и подгоночная кривая (линия) для МРЗ W/Si с тонкими слоями вольфрама ($\lambda = 0,154$ нм).

Fig. 5. Small-angle reflectogram (circles) and fitting curve (line) for W/Si multilayer with thin W-layers ($\lambda = 0.154$ nm).

величины межфазных шероховатостей (с 0,31 до 0,37 нм). С другой стороны, больший период может означать, что часть вольфрама может находиться либо в свободном состоянии, либо образовывать силицид W_5Si_3 , а не WSi_2 , как это было указано выше. Например, достаточно точная подгонка получается для $\beta_{WSi_2} = 0,128$, если взять плотность WSi_2 на 5% выше табличной.

Разрешающие способности ($\lambda/\Delta\lambda$) в жёсткой рентгеновской области ($\lambda = 0,154$ нм) для первых двух максимумов составляют 112 (1-й) и 217 (2-й). Более низкое разрешение по сравнению с числом рассеивающих слоёв ($N = 185$) в первом максимуме связано с динамическим эффектом отражения рентгеновских лучей или первичной экстинкцией, которые имеют место при $R > 10\%$ [42–44]. Относительно невысокое разрешение во 2-м максимуме ($\lambda/\Delta\lambda < 370 = 185 \cdot 2$) может быть связано либо с небольшим дрейфом периода по глубине МРЗ в процессе изготовления либо с неоднородностью покрытия по поверхности подложки в пределах зоны облучения рентгеновскими лучами, которая составляла $\cong 3 \times 8$ мм².

Измерение рентгено-оптических характеристик изготовленного зеркала в мягкой рентгеновской области было проведено на синхротроне Физического института при Боннском университете. В качестве кристалла-монокроматора использовался КАР. На рисунке 6 показана кривая отражения от изготовленного зеркала на длине волны 2,066 нм, записанная в режиме ω -сканирования при фиксированном положении КАР и детектора. Как видно из рисунка, фор-

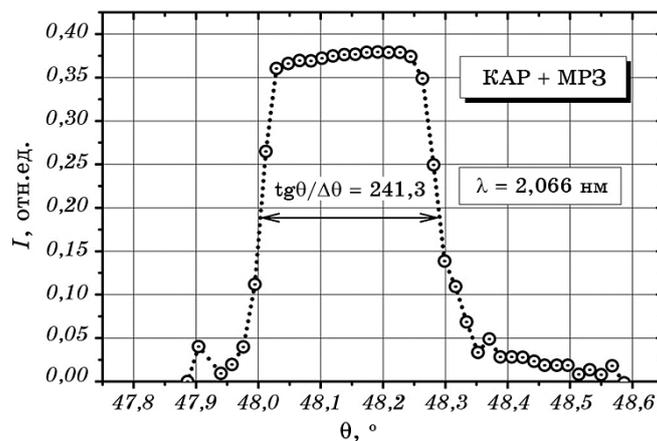


Рис. 6. Кривая отражения МРЗ W/Si с периодом $d \cong 2,8$ нм при ω -сканировании в синхротронном излучении при использовании органического кристалла КАР в качестве кристалла-монокроматора.

Fig. 6. Rocking curve for W/Si multilayer with period $d \cong 2.8$ nm measured at synchrotron radiation with organic crystal KAP as a monochromator.

ма пика достаточно симметрична и не содержит каких-либо «развалов». Разрешающая способность $\theta/\Delta\theta > 240$. Это примерно в 2–4 раза меньше разрешающей способности органического кристалла КАР на этой длине волны [38].

Разрешающая способность стандартных зеркал W/Si на кислородной линии составляет ≈ 40 [2, 41]. Применение сдвоенного монохроматора МРЗ/МРЗ повышает разрешение до ≈ 100 [4]. Использование пары МРЗ/КАР поднимает разрешающую способность до ≈ 800 [4], однако повышение разрешения здесь достигается за счёт использования кристалла КАР. В нашем же случае КАР оставался в фиксированном положении, а осуществлялось вращение только зеркала. Поэтому полученное разрешение характеризует только зеркало W/Si, а КАР играл роль хорошего монохроматора и коллиматора. Аналогичные исследования проводились в работе [15] для МРЗ, в которых вместо слоя W напылялся слой WSi₂ из мишени аналогичного состава, чтобы сразу получить зеркала WSi₂/Si с высоким разрешением. Максимальное разрешение 0,46% ($\text{tg}\theta/\Delta\theta \approx 217$) было получено для зеркала WSi₂/Si с периодом ≈ 2 нм на длине волны $\lambda = 0,124$ нм; на другой длине волны ($\lambda = 0,05$ нм) это же зеркало имело разрешение 0,67% ($\text{tg}\theta/\Delta\theta \approx 149$). Хотя эти результаты получены для более жёсткого рентгеновского спектра, однако в этом диапазоне коэффициенты поглощения кремния ниже, чем на кислородной линии, и поэтому добиться здесь хорошего разрешения легче.

Разрешающая способность полученного в данной работе зеркала, по меньшей мере, в 5 раз выше разрешающей способности стандартного многослойного зеркала и многослойной оптики на основе W/Si, применяемой на синхротронах [2, 41].

Интересно отметить, что разрешающие способности других многослойных систем на кислородной линии также уступают полученному в данной работе результату. Так, например МРЗ W/B₄C с периодами 1,2–1,4 нм имели разрешающие способности на кислородной линии в пределах 81–144 [45].

Мы измерили разрешающую способность этого же зеркала на других длинах волн в диапазоне от 0,8 до 2,1 нм. Результаты этих измерений представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что разрешающая способность зеркала падает с уменьшением длины волны от 240 до 50. Поскольку такая ситуация наблюдается на одном зеркале, то это не связано с неоднородностью периода по глубине. Скорее всего, такая картина указывает на неоднородность периода многослойного покрытия по области облучения синхротронным излучением, которая росла от $2,5 \times 10$ мм² до 9×10 мм² на поверхности МРЗ с уменьшением длины волны. Как мы можем видеть из этого результата, непрерывное вращение подложки, используемое при изготовлении МРЗ, привело к улучшению равномерности толщины покрытия в тангенциальном направлении, что обеспечило возмож-

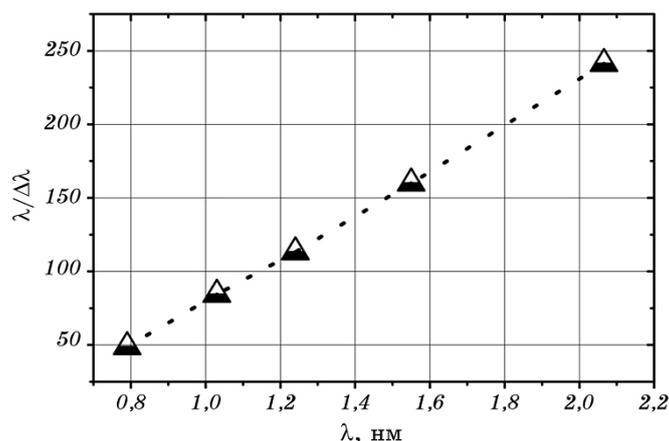


Рис. 7. Разрешающая способность МРЗ W/Si как функция длины волны синхротронного излучения.

Fig. 7. Resolving power of W/Si multilayer as a function of wavelength under synchrotron radiation.

ность достижения высокого разрешения. Поэтому дальнейшей задачей является улучшение равномерности толщины многослойного покрытия в радиальном направлении.

Основной примесью в многослойных зеркалах W/Si является кислород, который попадет в покрытие в процессе изготовления вследствие большей химической активности. Поглощение атомов кислорода примерно в 1,5 раза выше, чем у атомов кремния, на длине волны $\cong 2,1$ нм, поэтому наличие кислорода в многослойном покрытии должно повышать его общее поглощение на этой длине волны. В излучении OK_{α} поглощение атомов кислорода падает в 15 раз, поэтому здесь наличие кислорода в покрытии понижает его общее поглощение. Таким образом, с учётом меньшей области облучения МРЗ W/Si на кислородной линии можно ожидать, по меньшей мере, такую же разрешающую способность, как и на длине волны $\cong 2,1$ нм.

4. ВЫВОДЫ

Продемонстрирована обязательность включения силицидных прослоек в описание строения реальных МРЗ W/Si с периодами $d < 6$ нм, изготовленных методом прямого магнетронного распыления. Состав прослоек близок к дисилициду вольфрама, а их толщины для зеркал с периодами $d > 2$ нм составляют $0,68 \pm 0,05$ нм.

Наличие силицидных прослоек играет основную роль в снижении отражательной способности зеркал W/Si на линии OK_{α} ($\lambda = 2,36$ нм)

по сравнению с влиянием межфазных шероховатостей. Сделана оценка доли W-содержащего слоя в периоде с учётом наличия в этих слоях дисилицида вольфрама.

Результаты, полученные в данной работе, позволяют изготовить МРЗ WSi_2/Si ($d \cong 2,8$ нм) с разрешающей способностью $\theta/\Delta\theta \cong 240$ на кислородной линии ($\lambda = 2,36$ нм), что, по меньшей мере, вдвое больше по сравнению с характеристиками существующих многослойных зеркал.

Для дальнейшего совершенствования МРЗ, например, повышения коэффициента отражения и разрешающей способности, необходимо понижать толщины силицидных прослоек и улучшать равномерность покрытия по поверхности подложки.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. J. Potts and A. G. Tindle, *Mineralogical Magazine*, **53**, No. 371: 357 (1989).
2. T. C. Huang, A. Fung, and R. L. White, *X-Ray Spectrometry*, **18**, No. 2: 53 (1989).
3. F. Frontera and G. Pareschi, *Proc. SPIE*, **2515**: 2 (1995).
4. F. Schäfers, M. Grioni, J. Wood, H. van Brug, E. J. Puik, M. Dapor, and F. Marchetti, *Proc. SPIE*, **984**: 23 (1988).
5. S. W. Kortboyer, J. B. Goedkoop, F. M. F. De Groot, M. Grioni, J. C. Fuggle, and H. Petersen, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **275**, No. 2: 435 (1989).
6. C. Michaelsen, P. Ricardo, D. Anders, M. Schuster, J. Schilling, and H. Göbel, *Advances in X-ray Analysis*, **42**: 308 (2000).
7. A. Erko, F. Schäfers, B. Vidal, A. Yakshin, U. Pietsch, and W. Mahler, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, No. 10: 4845 (1995).
8. K. D. Joensen, P. Høghøj, F. Christensen, P. Gorenstein, J. Susini, E. Ziegler, and A. Freund, *J. Wood, Proc. SPIE*, **2011**: 360 (1994).
9. D. Spiga, A. Mirone, G. Pareschi, R. Canestrari, V. Cotroneo, C. Ferrari, C. Ferrero, L. Lazzarini, and D. Vernani, *Proc. SPIE*, **6266**: 626616 (2006).
10. M. Jergel, P. Mikulík, E. Majková, Š. Luby, R. Senderák, E. Pinčík, M. Brunel, P. Hudek, I. Kostič, and A. Konečnicková, *Materials Structure*, **6**, No. 1: 11 (1999).
11. M. Jergel, C. Falcony, P. Mikulík, L. Ortega, E. Majková, E. Pinčík, Š. Luby, I. Kostič, and P. Hudek, *Superficies y Vacío*, No. 13: 10 (2001).
12. R. M. Fechtchenko, A. V. Vinogradov, and D. L. Voronov, *Opt. Commun.*, **210**, Nos. 3–6: 179 (2002).
13. P. Mikulík, M. Jergel, T. Baumbach, E. Majková, E. Pinčík, Š. Luby, L. Ortega, R. Tucoulou, P. Hudek, and I. Kostič, *J. Phys. D*, **34**, No. 10: A188 (2001).
14. M. Jergel, P. Mikulík, E. Majková, Š. Luby, R. Senderák, E. Pinčík, M. Brunel, P. Hudek, I. Kostič, and A. Konečnicková, *J. Appl. Phys.*, **85**, No. 2: 1225 (1999).
15. Ch. Liu, R. Conley, A. T. Macrander, J. Maser, H. C. Kang, M. A. Zurbuchen, and G. B. Stephenson, *J. Appl. Phys.*, **98**, No. 1: 113519 (2005).
16. H. C. Kang, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander, J. Maser, S. Bajt, and H. N. Chapman, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, No. 1: 151109 (2005).
17. H. C. Kang, J. Maser, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander,

- and S. Vogt, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, No. 12: 127401 (2006).
18. H. Ch. Kang, G. B. Stephenson, Ch. Liu, R. Conley, R. Khachatryan, M. Wiecezorek, A. T. Macrander, H. Yan, J. Maser, J. Hiller, and R. Koritala, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, No. 4: 046103 (2007).
 19. И. А. Артюков, В. А. Бурцев, А. В. Виноградов, А. Ю. Девизенко, Н. В. Калинин, И. А. Копылец, В. Е. Пуха, Б. А. Савицкий, Р. М. Фещенко, *ЖТФ*, **82**, № 9: 101 (2012).
 20. N. F. Brejnholt, F. E. Christensen, C. J. Hailey, N. M. Barrière, W. W. Craig, B. Grefenstette, J. Koglin, K. KruseMadsen, J. K. Vogel, H. An, K. Blaedel, J. Brown, T. Decker, Z. Haider, A. C. Jakobsen, C. P. Cooper-Jensen, K. Mori, M. Nynka, M. J. Pivovarov, C. Sleator, D. Stefanik, M. Stern, G. Tajiri, D. Thornhill, and J. S. Cushman, *X-Ray Optics and Instrumentation*, **2011**: ID 285079 (2011).
 21. K. K. Madsen, F. E. Christensen, C. P. Jensen, E. Ziegler, W. W. Craig, K. Gunderson, J. E. Koglin, and K. Pedersen, *Proc. SPIE*, **5168**: 41 (2004).
 22. K. D. Joensen, P. Voutov, A. Szentgyorgyi, J. Roll, P. Gorenstein, P. Høghøj, and F. E. Christensen, *Appl. Opt.*, **34**, No. 34: 7935 (1995).
 23. P. H. Mao, F. A. Harrison, Y. Y. Platonov, D. M. Broadway, B. DeGroot, F. E. Christensen, W. W. Craig, and C. J. Hailey, *Proc. SPIE*, **3114**: 526 (1997).
 24. D. L. Windt, F. E. Christensen, W. W. Craig, C. Hailey, F. A. Harrison, M. Jimenez-Garate, R. Kalyanaraman, and P. H. Mao, *J. Appl. Phys.*, **88**, No. 1: 460 (2000).
 25. J. B. Kortright, St. Joks, and E. Ziegler, *J. Appl. Phys.*, **69**, No. 1: 168 (1991).
 26. Y. S. Chu, C. Liu, D. C. Mancini, F. De Carlo, A. T. Macrander, B. Lai, and D. Shu, *Rev. Sci. Instrum.*, **73**, No. 3: 1485 (2002).
 27. L. E. Berman, Z. Yin, S. B. Dierker, E. Dufresne, S. G. J. Mochrie, O. K. C. Tsui, S. K. Burley, F. Shu, X. Xie, M. S. Capel, and R. M. Sweet, *AIP Conf. Proc.*, **417**: 71 (1997).
 28. E. Ziegler, Y. Lepêtre, S. Joks, V. Saile, S. Mourikis, P. J. Viccaro, G. Rolland, and F. Laugier, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, No. 7: 1999 (1989).
 29. A. K. Freund, *Structure*, **4**, No. 2: 121 (1996).
 30. W. C. Shih and W. M. Stobbs, *Ultramicroscopy*, **32**: 219 (1990).
 31. M. M. Hasan, R. J. Highmore, and R. E. Somekh, *Vacuum*, **43**, Nos. 1/2: 55 (1992).
 32. D. L. Windt, F. E. Christensen, W. W. Craig, C. Hailey, F. A. Harrison, M. Jimenez-Garate, R. Kalyanaraman, and P. H. Mao, *J. Appl. Phys.*, **88**, No. 1: 460 (2000).
 33. Y. P. Pershyn, E. N. Zubarev, V. V. Kondratenko, V. A. Sevryukova, and S. V. Kurbatova, *Appl. Phys. A*, **103**, No. 4: 1021 (2011).
 34. W. S. Lau, J. Zhang, X. Wan, J. K. Luo, Y. Xu, and H. Wong, *AIP Advances*, **4**: 027120 (2014).
 35. Y.-P. Wang, H. Zhou, L. Zhou, and R. L. Headrick, A. T. Macrander, and A. S. Özcan, *J. Appl. Phys.*, **101**, No. 2: 023503 (2007).
 36. E. Spiller, S. Baker, E. Parra, and C. Tarrío, *Proc. SPIE*, **3767**: 143 (1999).
 37. *Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник* (Ред. Н. П. Лякишев) (Москва: Машиностроение: 2000), т. 3, книга 2, с. 301.
 38. *Зеркальная рентгеновская оптика* (Ред. А. В. Виноградов) (Ленинград: Машиностроение: 1989).
 39. B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis, *Atomic Data and Nuclear Tables*,

- 54, No. 2: 181 (1993).
40. J. Gautier, F. Delmotte, F. Bridou, M. F. Ravet, F. Varniere, M. Roulliy, A. Jerome, and I. Vickridge, *Appl. Phys. A*, **88**, No. 4: 719 (2007).
 41. G. Love and V. D. Scott, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 90: 349 (1987).
 42. Р. Джеймс, *Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей* (Москва: Иностранная литература: 1950).
 43. Э. Г. Пинскер, *Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах* (Москва: Наука: 1974).
 44. В. И. Иверонова, Г. П. Ривкевич, *Теория рассеяния рентгеновских лучей* (Москва: Издательство МГУ: 1978).
 45. Y. Platonov, L. Gomez, and D. Broadway, *Proc. SPIE*, **4782**: 152 (2002).

REFERENCES

1. P. J. Potts and A. G. Tindle, *Mineralogical Magazine*, **53**, No. 371: 357 (1989).
2. T. C. Huang, A. Fung, and R. L. White, *X-Ray Spectrometry*, **18**, No. 2: 53 (1989).
3. F. Frontera and G. Pareschi, *Proc. SPIE*, **2515**: 2 (1995).
4. F. Schäfers, M. Grioni, J. Wood, H. van Brug, E. J. Puik, M. Dapor, and F. Marchetti, *Proc. SPIE*, **984**: 23 (1988).
5. S. W. Kortboyer, J. B. Goedkoop, F. M. F. De Groot, M. Grioni, J. C. Fuggle, and H. Petersen, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **275**, No. 2: 435 (1989).
6. C. Michaelsen, P. Ricardo, D. Anders, M. Schuster, J. Schilling, and H. Göbel, *Advances in X-ray Analysis*, **42**: 308 (2000).
7. A. Erko, F. Schäfers, B. Vidal, A. Yakshin, U. Pietsch, and W. Mahler, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, No. 10: 4845 (1995).
8. K. D. Joensen, P. Høghøj, F. Christensen, P. Gorenstein, J. Susini, E. Ziegler, and A. Freund, *J. Wood, Proc. SPIE*, **2011**: 360 (1994).
9. D. Spiga, A. Mirone, G. Pareschi, R. Canestrari, V. Cotroneo, C. Ferrari, C. Ferrero, L. Lazzarini, and D. Vernani, *Proc. SPIE*, **6266**: 626616 (2006).
10. M. Jergel, P. Mikulík, E. Majková, Š. Luby, R. Senderák, E. Pinčík, M. Brunel, P. Hudek, I. Kostič, and A. Konečnicková, *Materials Structure*, **6**, No. 1: 11 (1999).
11. M. Jergel, C. Falcony, P. Mikulík, L. Ortega, E. Majková, E. Pinčík, Š. Luby, I. Kostič, and P. Hudek, *Superficies y Vacío*, No. 13: 10 (2001).
12. R. M. Fechtchenko, A. V. Vinogradov, and D. L. Voronov, *Opt. Commun.*, **210**, Nos. 3–6: 179 (2002).
13. P. Mikulík, M. Jergel, T. Baumbach, E. Majková, E. Pinčík, Š. Luby, L. Ortega, R. Tucoulou, P. Hudek, and I. Kostič, *J. Phys. D*, **34**, No. 10: A188 (2001).
14. M. Jergel, P. Mikulík, E. Majková, Š. Luby, R. Senderák, E. Pinčík, M. Brunel, P. Hudek, I. Kostič, and A. Konečnicková, *J. Appl. Phys.*, **85**, No. 2: 1225 (1999).
15. Ch. Liu, R. Conley, A. T. Macrander, J. Maser, H. C. Kang, M. A. Zurbuchen, and G. B. Stephenson, *J. Appl. Phys.*, **98**, No. 1: 113519 (2005).
16. H. C. Kang, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander, J. Maser, S. Bajt, and H. N. Chapman, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, No. 1: 151109 (2005).
17. H. C. Kang, J. Maser, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander, and S. Vogt, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, No. 12: 127401 (2006).
18. H. Ch. Kang, G. B. Stephenson, Ch. Liu, R. Conley, R. Khachatryan,

- M. Wiczorek, A. T. Macrander, H. Yan, J. Maser, J. Hiller, and R. Koritala, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, No. 4: 046103 (2007).
19. I. A. Artyukov, V. A. Burtsev, A. V. Vinogradov, A. Yu. Devizenko, N. V. Kalinin, I. A. Kopylets, V. E. Pukha, B. A. Savitskiy, and R. M. Feshchenko, *ZhTF*, **82**, No. 9: 101 (2012) (in Russian).
 20. N. F. Brejnholt, F. E. Christensen, C. J. Hailey, N. M. Barrière, W. W. Craig, B. Grefenstette, J. Koglin, K. KruseMadsen, J. K. Vogel, H. An, K. Blaedel, J. Brown, T. Decker, Z. Haider, A. C. Jakobsen, C. P. Cooper-Jensen, K. Mori, M. Nynka, M. J. Pivovarov, C. Sleator, D. Stefanik, M. Stern, G. Tajiri, D. Thornhill, and J. S. Cushman, *X-Ray Optics and Instrumentation*, **2011**: ID 285079 (2011).
 21. K. K. Madsen, F. E. Christensen C. P. Jensena, E. Zieglerb, W. W. Craige, K. Gundersonc, J. E. Koglind, and K. Pedersen, *Proc. SPIE*, **5168**: 41 (2004).
 22. K. D. Jensen, P. Voutov, A. Szentgyorgyi, J. Roll, P. Gorenstein, P. Høghøj, and F. E. Christensen, *Appl. Opt.*, **34**, No. 34: 7935 (1995).
 23. P. H. Mao, F. A. Harrison, Y. Y. Platonov, D. M. Broadway, B. DeGroot, F. E. Christensen, W. W. Craig, and C. J. Hailey, *Proc. SPIE*, **3114**: 526 (1997).
 24. D. L. Windt, F. E. Christensen, W. W. Craig, C. Hailey, F. A. Harrison, M. Jimenez-Garate, R. Kalyanaraman, and P. H. Mao, *J. Appl. Phys.*, **88**, No. 1: 460 (2000).
 25. J. B. Kortright, St. Joksche, and E. Ziegler, *J. Appl. Phys.*, **69**, No. 1: 168 (1991).
 26. Y. S. Chu, C. Liu, D. C. Mancini, F. De Carlo, A. T. Macrander, B. Lai, and D. Shu, *Rev. Sci. Instrum.*, **73**, No. 3: 1485 (2002).
 27. L. E. Berman, Z. Yin, S. B. Dierker, E. Dufresne, S. G. J. Mochrie, O. K. C. Tsui, S. K. Burley, F. Shu, X. Xie, M. S. Capel, and R. M. Sweet, *AIP Conf. Proc.*, **417**: 71 (1997).
 28. E. Ziegler, Y. Lepêtre, S. Joksche, V. Saile, S. Mourikis, P. J. Viccaro, G. Rolland, and F. Laugier, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, No. 7: 1999 (1989).
 29. A. K. Freund, *Structure*, **4**, No. 2: 121 (1996).
 30. W. C. Shih and W. M. Stobbs, *Ultramicroscopy*, **32**: 219 (1990).
 31. M. M. Hasan, R. J. Highmore, and R. E. Somekh, *Vacuum*, **43**, Nos. 1/2: 55 (1992).
 32. D. L. Windt, F. E. Christensen, W. W. Craig, C. Hailey, F. A. Harrison, M. Jimenez-Garate, R. Kalyanaraman, and P. H. Mao, *J. Appl. Phys.*, **88**, No. 1: 460 (2000).
 33. Y. P. Pershyn, E. N. Zubarev, V. V. Kondratenko, V. A. Sevryukova, and S. V. Kurbatova, *Appl. Phys. A*, **103**, No. 4: 1021 (2011).
 34. W. S. Lau, J. Zhang, X. Wan, J. K. Luo, Y. Xu, and H. Wong, *AIP Advances*, **4**: 027120 (2014).
 35. Y.-P. Wang, H. Zhou, L. Zhou, and R. L. Headrick, A. T. Macrander, and A. S. Özcan, *J. Appl. Phys.*, **101**, No. 2: 023503 (2007).
 36. E. Spiller, S. Baker, E. Parra, and C. Tarrío, *Proc. SPIE*, **3767**: 143 (1999).
 37. *Diagrammy Sostoyaniya Dvoynykh Metallicheskih Sistem. Spravochnik* (Ed. N. P. Lyakishev) (Moscow: Mashinostroenie: 2000), vol. 3, book 2, p. 301 (in Russian).
 38. *Zerkal'naya Rentgenovskaya Optika* (Ed. A. V. Vinogradov) (Leningrad: Mashinostroenie: 1989) (in Russian).
 39. B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis, *Atomic Data and Nuclear Tables*, **54**, No. 2: 181 (1993).

40. J. Gautier, F. Delmotte, F. Bridou, M. F. Ravet, F. Varniere, M. Roulliy, A. Jerome, and I. Vickridge, *Appl. Phys. A*, **88**, No. 4: 719 (2007).
41. G. Love and V. D. Scott, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 90: 349 (1987).
42. R. James, *Opticheskie Printsipy Difraksii Rentgenovskikh Luchey* (Moscow: Inostrannaya Literatura: 1950) (in Russian).
43. Z. G. Pinsker, *Dinamicheskoe Rasseyanie Rentgenovskikh Luchey v Ideal'nykh Kristallakh* (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
44. V. I. Iveronova and G. P. Rivkevich, *Teoriya Rasseyaniya Rentgenovskikh Luchey* (Moscow: Izdatel'stvo MGU: 1978) (in Russian).
45. Y. Platonov, L. Gomez, and D. Broadway, *Proc. SPIE*, **4782**: 152 (2002).