

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕЖСЛОЕВЫХ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЯХ Cr/Sc И Co/C МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОГО ДИФФУЗНОГО РАССЕЙЯНИЯ

И.А. Журавель, Е.А. Бугаев, А.Ю. Девизенко, Ю.П. Першин, В.В. Кондратенко

Поступила в редакцию 03.06.2011

*Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”
Украина*

Методом рентгеновского диффузного рассеяния на длине волны 0,154 нм проведено исследование шероховатости и перемешивания на границах раздела многослойных пленочных композиций Cr/Sc и Co/C с периодами ~ 5 – 7 нм, полученных методом магнетронного распыления. Исследовано влияние на структуру границ раздела композиций Co/C часового отжига в интервале температур 100 – 330 °С. Полученные статистические характеристики шероховатости границ раздела позволяют предсказать рентгенооптические характеристики многослойных композиций, применяемых в рентгеновской оптике в диапазоне длин волн 3 – 5 нм.

Ключевые слова: функция плотности спектральной мощности, рентгеновское диффузное рассеяние, шероховатость, многослойные пленки, диффузионное перемешивание.

Методом рентгеновського дифузного розсіювання на довжині хвилі 0,154 нм проведено дослідження шорсткості та перемішування на межах поділу багат шарових плівкових композицій Cr/Sc та Co/C із періодами ~ 5 – 7 нм, отриманих методом магнетронного розпилення при постійному струмі. Досліджений вплив на структуру меж поділу композицій Co/C годинного відпалу в інтервалі температур 100 – 330 °С. Отримані статистичні характеристики шорсткості меж поділу дозволяють передбачити рентгенооптичні характеристики багат шарових композицій, що використовуються у рентгеновській оптиці у діапазоні довжин хвиль 3 – 5 нм.

Ключові слова: функція спектральної густини потужності, рентгеновське дифузне розсіювання, шорсткість, багат шарові плівки, дифузійне змішування.

Study of the interface roughness and diffuseness of the Cr/Sc and Co/C multilayer with ~ 5 – 7 nm the periods on 0,154 wavelength obtained by DC magnetron sputtering has been conducted by X-ray diffuse scattering method. Influence of hour time annealing in 100 – 330 °C temperature range on the Co/C interface structure has been established. Obtained statistical characteristics of interface roughness are useful to forecast X-ray optic characteristics of multilayers using in X-ray optics in 3 – 5 nm wavelength range.

Keywords: power spectral density function, x-ray diffuse scattering, roughness, multilayered films, diffusivity mixing.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные периодические покрытия нанометрового масштаба получили широкое применение в различных областях науки и техники [1]. Пленочные композиции из периодически чередующихся слоев материалов с минимальным коэффициентом поглощения и с максимальным коэффициентом отражения, соответственно, являются отражающим покрытием в рентгеновских зеркалах для диапазона длин волн 0,1 – 50 нм. Отражательная способность таких рентгеновских зеркал зависит от концентрационной резкости и гладкости границ раздела слоев многослойной композиции [2]. Распространенным методом

синтеза рентгеновских зеркал является магнетронное распыление. Относительно высокая энергия осаждаемых на подложку частиц (~1 – 15 эВ) [3] приводит к тому, что на границах раздела слоев могут присутствовать следующие виды дефектов, ослабляющих коэффициент отражения: шероховатость границ раздела и перемешанные зоны. В реальных композициях зачастую сосуществуют оба этих дефекта. Особенно остро проблема дефектов границы раздела встает при синтезе короткопериодных композиций с толщиной слоев 1 – 2 нм, так как коэффициент отражения зависит от соотношения между шероховатостью и периодом следующим образом [2]:

$$R = \exp \left\{ - \left(2\pi m \frac{\langle \sigma_r \rangle}{d} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения, σ_r – шероховатость, d – период многослойной периодической композиции, m – порядок отражения.

Одним из методов исследования внутренней структуры границ раздела является метод рентгеновского диффузного рассеяния (РДР). Это неразрушающий метод, дающий усредненную по площади образца информацию о пространственном частотном распределении размеров шероховатости и позволяющий определить степень корреляции шероховатости соседних границ раздела. К сожалению, данные РДР являются усредненными по бесконечному ансамблю пространственно-когерентных пучков, так как, как правило, размеры когерентности падающего рентгеновского пучка намного меньше его физических размеров [4]. Тем не менее, данный метод привлекает к себе повышенный интерес благодаря возможности получить количественные оценки коэффициентов отражения в различных частях рентгеновского спектра. Метод РДР основан на регистрации индикатрисы рассеяния рентгеновских лучей, интенсивность которой пропорционально связана с функцией спектральной плотности мощности PSD(ν) (ν – пространственная частота), наиболее полно описывающей шероховатость поверхности [5, 6]. PSD-функция позволяет на основе результатов измерений на одной длине волны предсказать величину и угловое распределение рассеяния на другой длине волны. Если функция PSD(ν) известна для всего диапазона пространственных частот $\nu \in [0, \infty]$, можно определить корреляционную функцию и среднеквадратичную величину шероховатостей по стохастическим теориям [7]. Функция PSD(S) задается следующим образом:

$$\text{PSD}(\nu) = \begin{cases} \frac{H}{\pi} \sigma_r^2 \xi_{\parallel}^2, & \nu < \frac{1}{2\pi\xi_{\parallel}} \\ \frac{H}{\pi} \frac{\sigma_r^2}{\xi_{\parallel}^{2H}} \nu^{-2(H+1)}, & \nu \geq \frac{1}{2\pi\xi_{\parallel}} \end{cases}. \quad (2)$$

Здесь σ_r – шероховатость границ раздела, ξ_{\parallel} – горизонтальная корреляционная длина, H – зубчатость (параметр, характеризующий фрактальные свойства межслоевых границ).

Целью данной работы было исследование методом РДР шероховатости границ раздела в многослойных композициях Cr/Sc и Co/C. При этом предполагалось количественно разделить шероховатость границ раздела и величину перемешанных зон для оценки эффективности использования этих композиций в мягкой области рентгеновского спектра (3 – 5 нм). Знать, какой именно дефект вызывает падение отражательной способности, важно по ряду причин. В первую очередь данное знание позволяет внести необходимые коррективы в технологию изготовления многослойных периодических композиций (МПК) с целью устранения данного дефекта. Кроме того, шероховатость, в отличие от перемешанных зон, существенно влияет не только на коэффициент отражения, но и на разрешение оптической системы на основе многослойных рентгеновских зеркал [8]. Также важно было проверить МПК Co/C на термическую стойкость, так как в этой системе под влиянием температуры возможны фазовые изменения в слоях. Влияние отжига на структуру границ раздела в композиции Co/C исследовалось в интервале температур 100 – 330 °С.

МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многослойные периодические композиции Cr/Sc (число периодов, $N = 50$) и Co/C ($N = 20$ и $N = 80$) наносились на стеклянные подложки методом магнетронного распыления при постоянном токе. Вакуумная установка для осаждения многослойных периодических и аperiodических композиций оснащена двумя водоохлаждаемыми магнетронами с диаметрами мишеней ~10 см и вращающимся подложкодержателем ~Ø25 см [9]. Распыление проводилось при рабочем давлении аргона 0.3 Па для Cr/Sc и 0.17 Па для Co/C композиций.

Регистрация кривых малоугловой рентгеновской дифракции осуществлялась на дифрактометре ДРОН-3М в излучении $\text{Cu-K}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 0.15406$ нм) с использованием кососрезанного кремниевого монохроматора (110). Для формирования узкого падающего пучка перед образцом была установлена дополнительная вертикальная щель размером 80 мкм. Проводилось два вида съемки: θ - 2θ -сканирование с фокусировкой по Брэггу-Брентано и ω -сканирование в окрестностях дифракционных максимумов в диапазоне углов 2θ .

Качественный фазовый анализ МПК Cr/Sc проводился при помощи рентгеновского дифрактометра общего назначения ДРОН-3М.

Отжиг проходил в вакуумной установке ВУП-5 в печи, оснащенной двумя галогеновыми лампами ЛГ-750 мощностью 750 Ватт. Отжиг многослойных пленок Co/C проводился при температурах 100 – 330 °С при рабочем давлении $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ Па в течение одного часа.

Образцами для электронно-микроскопических исследований служили МПК Co/C, осажденные на кремниевую подложку. Снимки поперечного среза были сделаны при помощи просвечивающего электронного микроскопа ПЭМ-У.

Моделирование кривых малоугловой рентгеновской дифракции проводилось в программе IMD Д. Виндта [10], позволяющей моделировать кривые зеркального отражения и незеркального рассеяния на основе DWBA теории взаимодействия рентгеновских лучей с твердым телом [7]. Путем подгонки формы кривых малоугловой рентгеновской дифракции (θ - 2θ -сканирование) в программе IMD были рассчитаны следующие параметры МПК: период d , соотношение между толщинами слоев Γ , плотности компонентов ρ_s а также интегральная ширина границ раздела σ . При подгонке кривых РДР были получены следующие параметры границ раздела: шероховатость, σ_r , вертикальная корреляционная длина ξ_{\perp}^1 , горизонтальные корреляционные длины ξ_{\parallel} и параметры зубчатости H . Размер перемешанной зоны σd определялся из соотношения

$$\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_d^2} \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны результаты рентгеновского фазового анализа МПК Cr/Sc. Пики на дифрактограмме соответствуют отражениям от плоскостей (002) скандия (решетка ГПУ) и (110) хрома (решетка ОЦК), что свидетельствует о кристаллической структуре обоих слоев. Отсутствие остальных пиков может быть обусловлено либо недостаточно высокой чувствительностью дифрактометра, либо наличием текстуры. Последующий рентгенодифрактометрический анализ текстуры подтвердил ее наличие в слоях Cr и Sc, причем в случае хрома текстура оказалась более совершенной.

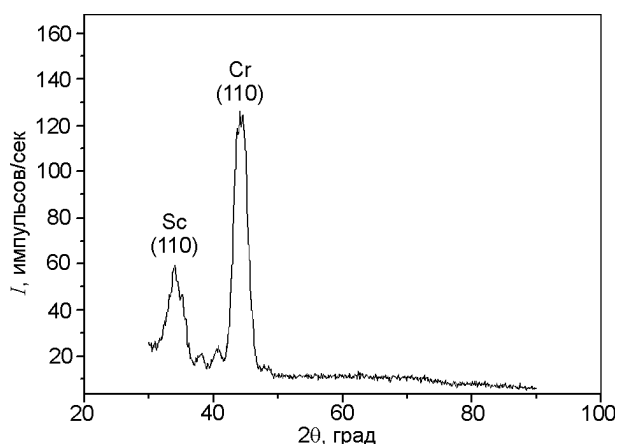
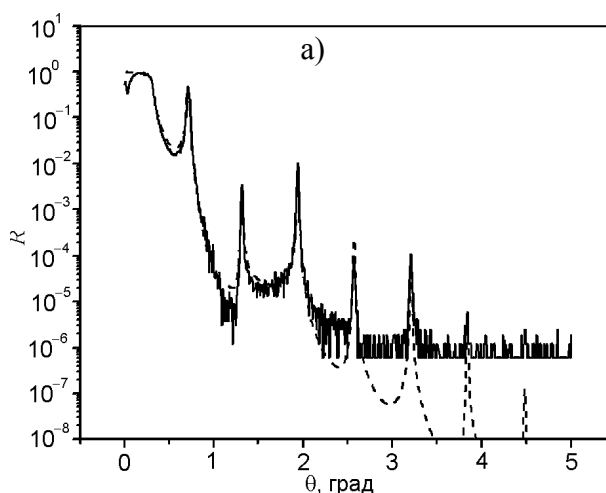


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма МПК Cr/Sc ($d = 6.92$ нм, $N = 50$).

Ранее проведенные исследования фазово-равновесной системы Cr/Sc показали, что МПК Cr/Sc обладает высокой отражательной способностью в спектральной области $3.1 < \lambda < 4.4$ нм, и между слоями отсутствует перемешивание [11]. Результаты моделирования кривых $R(\theta)$ и РДР приведены на рис. 2 и 3.



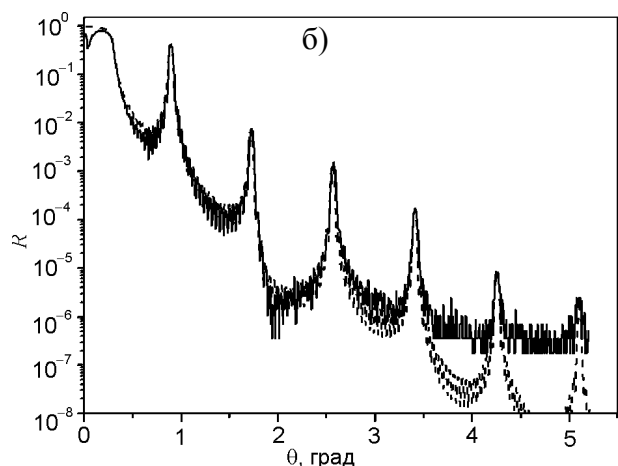


Рис. 2. Экспериментальные (—) и модельные (---) кривые зеркального отражения: а) – от многослойного покрытия Cr/Sc (число периодов, $N=50$), б) – от многослойного покрытия Co/C ($N=20$).

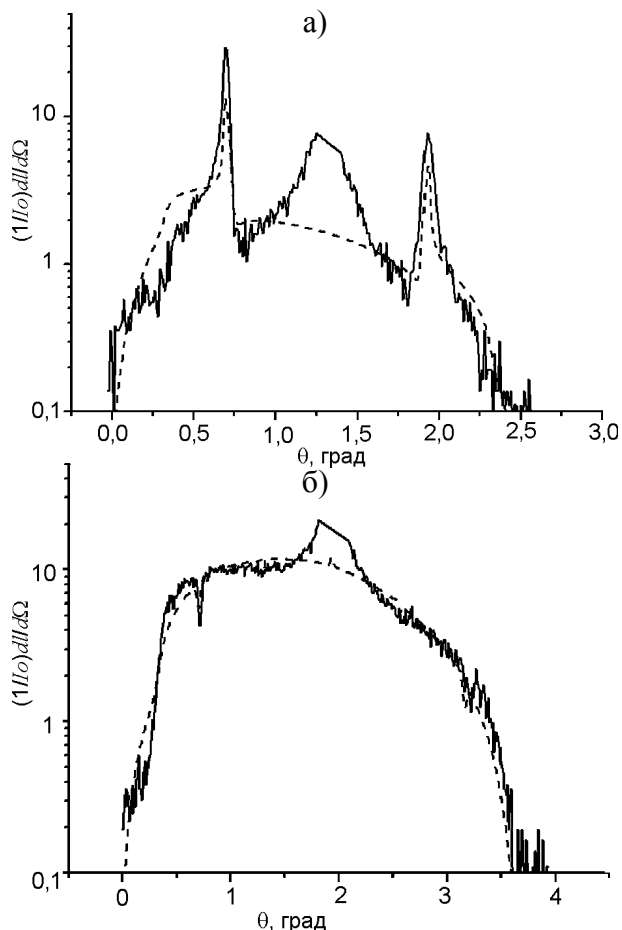


Рис. 3. Экспериментальные (—) и модельные (---) кривые диффузного рассеяния от многослойной пленочной композиции Cr/Sc ($N=50$) во втором (а) и в третьем (б) Брэгговском максимуме.

Расчитанные значения параметров МПК Cr/Sc приведены в табл. 1.

Видно, что величина шероховатости, σ_r , и зубчатость H на различных границах раздела отличаются незначительно. Шероховатость σ_r равна интегральной ширине интер-

фейса σ с погрешностью ~ 0.01 нм, что подтверждает отсутствие диффузионного перемешивания на границах раздела в системе Cr/Sc. Существенное различие между корреляционными длинами на разных границах раздела, по-видимому, связано с особенностями кристаллического строения каждого из слоев.

Особый интерес вызывает применение данной методики к фазово-равновесной системе Co/C, в которой, проведенные ранее исследования обнаружили диффузионное перемешивание между Co и C [12]. Метод РДР позволяет разделить шероховатость границ раздела и диффузионное перемешивание слоев.

Согласно данным электронно-микроскопических исследований МПК Co/C, слои углерода и кобальта находятся в аморфном состоянии и на изображении присутствует только амплитудный контраст. Поскольку плотность перемешанной зоны близка к плотности металлического слоя, на электронно-микроскопических снимках невозможно различить границу раздела между слоями кобальта и перемешанной зоны. Результаты моделирования малоугловой рентгеновской дифракции МПК Co/C представлены на рис. 2, результаты моделирования кривых РДР – на рис. 4. Расчитанные значения основных параметров приводятся в табл. 1.

В результате моделирования было выявлено, что на межслоевых границах раздела в МПК Co/C образуются перемешанные зоны величиной $\sigma_d \sim 0.2 - 0.3$ нм. Расчет их величины проводился по формуле (3). Граница раздела слоев при нанесении углерода на кобальт отлична от границы кобальта, нанесенного на углерод. Ширина интерфейса на границе “кобальт на углероде” в 1.4 раза больше, чем на границе “углерод на кобальте” (0.46 против 0.33 нм). Граница, “углерод на кобальте”, отличается большей шероховатостью и зубчатостью (~ 0.8 против ~ 0.6), и меньшей величиной горизонтальной корреляционной длины. Следовательно, кобальт вносит больший вклад в развитие межслоевой шероховатости. Значение шероховатости, σ_r , больше для МПК содержащей 80 пар слоев по сравнению с МПК $N=20$, что свидетельствует о

Таблица 1

Результаты моделирования кривых зеркального отражения и диффузного рассеяния для многослойных периодических композиций Cr/Sc ($N = 50$) и Co/C ($N = 20$ и $N = 80$). Здесь под слоем A подразумевается Co либо Cr, под $B - C$ – либо Sc

МПК	d , нм	Γ	$\sigma^{A/B}$, нм	$\sigma^{B/A}$, нм	$\sigma_r^{A/B}$, нм	$\sigma_r^{B/A}$, нм	ξ_{\perp} , нм	$\xi_{\parallel}^{A/B}$, нм	$\xi_{\parallel}^{B/A}$, нм	$H^{A/B}$	$H^{B/A}$
Cr/Sc	6.92	0.540	0.50	0.47	0.50	0.47	14	4,0	10,4	0.72	0.63
Co/C(20)	5.20	0.427	0.33	0.46	0.24	0.39	18	10	7	0.64	0.80
Co/C(80)	5.06	0.435	0.38	0.56	0.26	0.48	17	8	7,5	0.60	0.73

развитии шероховатости с ростом числа слоев. Поскольку метод РДР дает среднее значение по всем периодам в композиции, исследования особенностей шероховатости при отжиге проводились только для МПК Co/C, $N = 20$ как более достоверные.

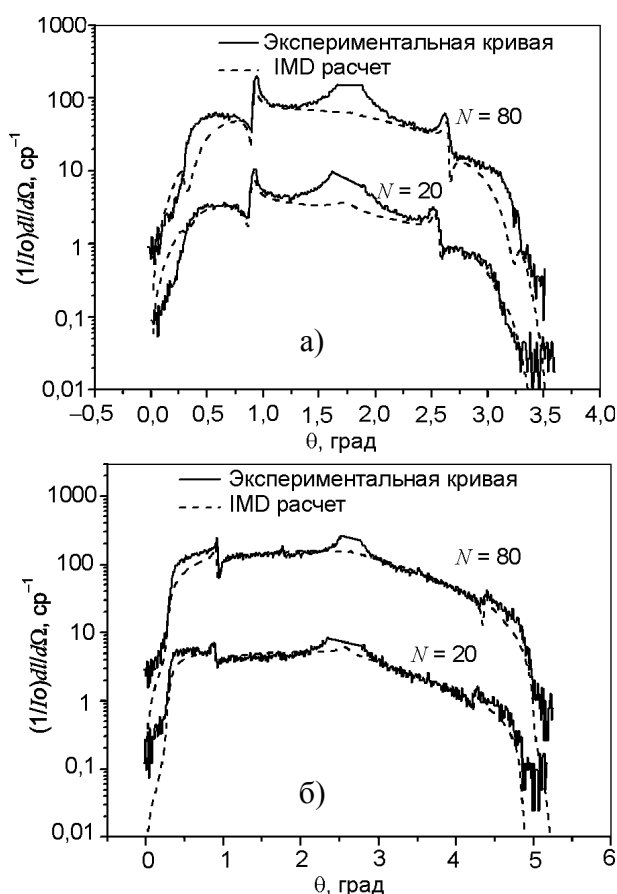


Рис. 4. Моделирование экспериментальных (зеркальная компонента опущена) кривых диффузного рассеяния многослойных композиций Co/C $N = 20$ и $N = 80$ (смещены на порядок вверх) во втором (а) и в третьем (б) Брэгговском максимуме.

Одно из применений МПК Co/C – рентгеновский флуоресцентный анализ углерода на характеристической длине волны $\lambda_{K\alpha} = 4.47$ нм. Параметры PSD функции для данного рентгеновского зеркала, позволили провести

расчет коэффициента отражения для МПК Co/C на этой длине волны при помощи программы IMD. Коэффициент отражения составил $R \approx 21\%$, разрешение $\Delta\lambda/\lambda = 0.041$, параметры в полной мере удовлетворительные для данной сферы применения [13].

С целью определения влияния температуры на процессы на границах раздела слоев была проведена серия отжигов композиции Co/C ($T_{отж} = 100$ °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 330 °C).

При отжиге наблюдается увеличение периода с интервалом стабильности от 150 °C до 200 °C (рис. 5).

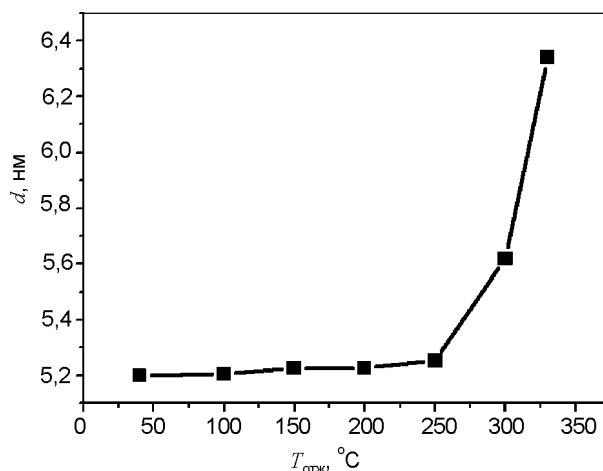


Рис. 5. Изменение периода многослойной композиции Co/C при отжиге.

Период МПК при температуре 250 °C больше исходного на ~1%. При отжиге 300 °C и выше происходит резкое возрастание периода МПК. При этих температурах структура пленки существенно меняется вследствие процессов межслоевой агломерации кобальта и графитизации аморфного углерода, о чем свидетельствуют данные электронно-микроскопических исследований (рис. 6).

Метод РДР косвенно подтверждает агломерацию кобальта. Видно, что картина диффуз-

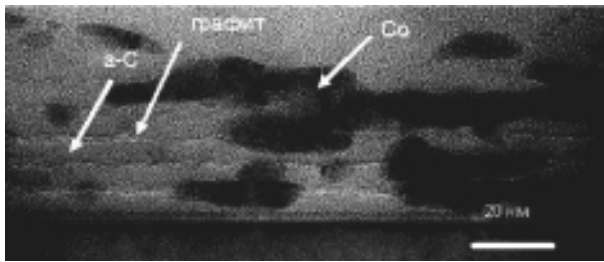


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза многослойного периодического покрытия Co/C после отжига 400 °C в течение 1 часа. Толщина слоя кобальта ≈ 2 нм.

ного рассеяния при старте этого процесса претерпевает существенные изменения (рис. 7). Кривая зеркального отражения образца после отжига на 330 °C хорошо подгоняется при значении плотности кобальта 5.5 г/см³ и соотношении между толщинами слоев $\Gamma = 0.510$ по сравнению с 8 г/см³ и $\Gamma = 0.408$ для температуры 300 °C, соответственно. Так как физически такое изменение плотности кобальта невозможно, данные значения указывают на то, что слои кобальта стали не-

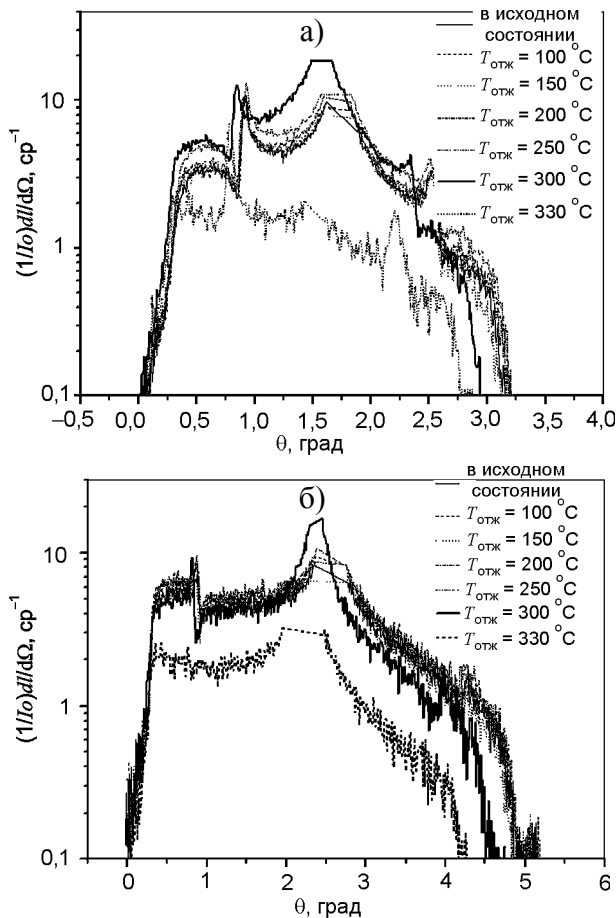


Рис. 7. Изменение кривых диффузного рассеяния многослойной композиции Co/C ($N = 20$) во втором (а) и в третьем (б) Брэгговском максимуме в процессе отжига.

сплошными. При низкой плотности слоев металла и сниженной с 18 до 6 нм вертикальной корреляционной длины, расчетные кривые РДР хорошо совпадают с экспериментальными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом РДР было проведено исследование границ раздела в многослойных пленочных композициях Cr/Sc и Co/C. При этом были определены параметры, согласно стохастической теории, характеризующие функцию спектральной плотности мощности на них, а именно горизонтальная корреляционная длина $\xi_{||}$, зубчатость H и шероховатость границ раздела σ_r , также были определены вертикальная корреляционная длина ξ_{\perp} и величина перемешанной зоны σ_d .

В МПК Cr/Sc ширина интерфейса σ равна величине шероховатости σ_r и составляет около 0.5 нм, что свидетельствует об отсутствии перемешанных зон.

В композиции Co/C обнаружено наличие перемешанных зон, их величина на разных границах практически одинакова и составляет $\sim 0.2 - 0.3$ нм.

Шероховатость границ раздела композиции Co/C в многослойной пленке растет с увеличением их количества. Функция плотности спектральной мощности различна на разных границах. Ширина интерфейса на границе “кобальт на углероде” в 1.4 раза больше, чем на границе “углерод на кобальте” (0.46 против 0.33 нм). Горизонтальная корреляционная длина на границе “кобальт на углероде” по сравнению с границей “углерод на кобальте” в 1.4 раза меньше (0.7 против 1 нм).

Границы раздела при нанесении углерода на кобальт отличны от границ, полученных нанесением кобальта на углерод. Это обусловлено тем, что кобальт вносит больший вклад в развитие межслоевой шероховатости.

Рассчитанный на основе полученных функций спектральной плотности мощности коэффициент отражения на длине волны 4,47 нм составил $\sim 21\%$, что обеспечивает высокую эффективность применения зеркал Co/C в системах рентгеновского флуоресцентного анализа.

Наблюдается рост периода композиции Co/C с увеличением температуры отжига с интервалом стабильности от 150 °С до 200 °С. При этом рост периода до температуры 250 °С включительно незначителен и составляет ~ 1%. При температуре отжига выше 300 °С происходит разрушение периодической структуры вследствие межслоевой агломерации металлических слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Windt D.L. et al. Growth, structure, and performance of depth-graded W/Si multilayers for hard x-ray optics// *Journal of applied physics.* – 2000. – Vol. 88. – P. 460-470.
2. Виноградов А.В., Брытов И.А., Грудский А.Я. и др. Зеркальная рентгеновская оптика/Под общ. ред. А.В. Виноградова. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 463 с.
3. Распыление под действием бомбардировки частицами. Вып. III. Характеристики распыленных частиц, применения в технике/Пер. с англ. Под ред. Р. Бериша и К. Виттмака. – М.: Мир, 1998. – 551 с.
4. Коваленко Н.В., Мытниченко С.В., Чернов В.А. Исследование кросс-корреляции шероховатости в многослойном зеркале Ni/C методом рентгеновского диффузного рассеяния//ЖЭТФ. – 2003. – Т. 24. – Вып. 6 (12). – С. 1345-1357.
5. Асадчиков В.Е., Виноградов А.В., Зрюев В.Н. Метод рентгеновского рассеяния в процессе изучения полировки сверхгладких подложек //Завод. лаб. Диагностика материалов.– 2001. – Т. 67, № 12. – С. 19-23.
6. Asadchikov V.E., Andreev E.E., Vinogradov A.V., Karabekov A.Yu., Postnov A.A., Sagitov S.I. Investigations of microroughness of superpolished surfaces by the X-Ray scattering technique//*Surface investigation.*– 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 887-900.
7. Stearns D.G, Gaines D.P., Sweeney D.-W., Gullikson E.M. Nonspecular x-ray scattering in a multilayer-coated imaging system//*J. of applied physics.* – 1998. – Vol. 84. – P. 1003-1028.
8. Spiller E. et al. Imaging performance of multilayer x-ray mirrors//*Applied physics letters* – 1992. – Vol. 61, № 13 – P. 1481-1483.
9. Бугаев Е.А. Формирование, структура и термическое разрушение многослойных пленочных систем Ni/C, Cr/C, Cr3C2/C, CrB2/C и TiC/C. – Дис. канд. физ.-мат. наук. – Харь-

ков: Харьковский государственный политехнический университет, 1999.

10. Windt D. L. IMD-Software for modeling the optical properties of multilayer films//*Computers in Physics* – 1998. – Vol. 12. – P. 360-370
11. Fedorenko A.I., Kondratenko V.V., Bugaev E.A., Pershin Yu.P., Ponomarenko A.G., Poltseva O.V., Kopylets I.A., Yulin S.A., Zubarev E.N. Multilayer X-Ray optics with enhanced thermal and radiation stability//*Proc. SPIE.* – 1995. – Vol. 2515. – P. 204-214.
12. Бугаев Е.А., Девизенко А.Ю., Зубарев Е.Н., Севрюкова В.А., Кондратенко В.В. Межслоевое взаимодействие и структурно-фазовые превращения в многослойной пленочной системе Co/C // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2008. – Т. 30, № 11. – С. 1533-1545.
13. Михайлов И.Ф., Батурин А.А., Бугаев Е.А. Определение углерода в сталях на портативной рентгеноспектральной аппаратуре//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 10. – С. 26-27.

LITERATURA

1. Windt D.L. et al. Growth, structure, and performance of depth-graded W/Si multilayers for hard x-ray optics// *Journal of applied physics.* – 2000. – Vol. 88. – P. 460-470.
2. Vinogradov A.V., Brytov I.A., Grudskiy A.Ya. i dr. Zerkalnaya rentgenovskaya optika/Pod red. A.V. Vinogradova. – L.: Mashinostroyeniye. Leningradskoye otdeleniye, 1989. – 463 s.
3. Raspyleniye pod deystviyem bombardirovki chastitsami. Vyp. III. Kharakteristiki raspylennykh chastits, primeneniya v tekhnike/Per. s angl. Pod red. R. Berisha i K. Vittmaka. – M.: Mir, 1998. – 551 s.
4. Kovalenko N.V., Mytnichenko S.V., Chernov V.A. Issledovaniye kross-korelyatsii sherokhovatosti v mnogoslonym zerkale Ni/C metodom rentgenovskogo diffuznogo rasseyaniya//ZhETF. – 2003. – Т. 24. – Vyp. 6 (12). – S. 1345-1357.
5. Asadchikov V.E., Vinogradov A.V., Zryuyev V.N. Metod rentgenovskogo rasseyaniya v protsesse izucheniya polirovki sverkhgladkikh podlozhek //Zavod. lab. Diagnostika materialov.– 2001. – Т. 67, № 12. – S. 19-23.
6. Asadchikov V.E., Andreev E.E., Vinogradov A.V., Karabekov A.Yu., Postnov A.A., Sagitov S.I. Investigations of microroughness of superpolished surfaces by the X-Ray scattering technique// *Surface investigation.*– 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 887-900.

7. Stearns D.G, Gaines D.P., Sweeney D.-W., Gullikson E.M. Nonspecular x-ray scattering in a multilayer-coated imaging system//J. of applied physics. – 1998. – Vol. 84. – P. 1003-1028.
8. Spiller E. et al. Imaging performance of multilayer x-ray mirrors//Applied physics letters – 1992. – Vol. 61, № 13 – P. 1481-1483.
9. Bugayev Ye.A. Formirovaniye, struktura i termicheskoye razrusheniye mnogoslonykh plenochnykh sistem Ni/C, Cr/C, Cr₃C₂/C, CrB₂/C i TiC/S. – Dis. kand. fiz.-mat. nauk. – Kharkov: Kharkovskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet, 1999.
10. Windt D. L. IMD-Software for modeling the optical properties of multilayer films//Computers in Physics – 1998. – Vol. 12. – P. 360-370
11. Fedorenko A.I., Kondratenko V.V., Bugaev E.A., Pershin Yu.P., Ponomarenko A.G., Poltseva O.V., Kopylets I.A., Yulin S.A., Zubarev E.N Multilayer X-Ray optics with enhanced thermal and radiation stability//Proc. SPIE. – 1995. – Vol. 2515. – P. 204-214.
12. Bugayev Ye.A., Devizenko A.Yu., Zubarev Ye.N., Sevryukova V.A., Kondratenko V.V. Mezhsloyevoye vzaimodeystviye i strukturno-fazovyye prevrashcheniya v mnogoslonoynoy plenochnoy sisteme Co/C//Metallofizika i noveyshiye tekhnologii. – 2008. – T. 30, № 11. – S. 1533-1545.
13. Mikhaylov I.F., Baturin A.A., Bugayev Ye.A. Opredeleniye ugleroda v stalyakh na portativnoy rentgenospektralnoy apparature//Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2007. – T. 73, № 10. – S. 26-27.