

Многослойные структуры на основе Ni для зеркал гебелевского типа

© К.В. Дуров, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, А.А. Ахсахалян, И.В. Малышев

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: zevs2801@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 мая 2024 г.

В окончательной редакции 7 мая 2024 г.

Принято к публикации 7 мая 2024 г.

Впервые исследованы характеристики многослойной структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$, перспективной для изготовления зеркал Гебеля. Определены структурные параметры многослойной структуры. Показано, что величины переходных областей для $\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$ и $\sigma(\text{Si})$ составляют 5 и 8.5 Å соответственно. Найден состав структур, при котором достигалась лучшая отражательная способность $R = 69.5\text{--}56.1\%$ для периодов 41.5–32 Å.

Ключевые слова: многослойные рентгеновские зеркала, магнетронное напыление, гебелевские зеркала.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58555.149-24

Введение

Важный шаг в области создания элементов для фокусировки или коллимации рентгеновских пучков для линейных источников был сделан, когда Göbel [1] предложил и экспериментально реализовал системы формирования на основе градиентных многослойных структур, нанесенных на поверхности эллиптического и параболического цилиндров. Период такой структуры изменяется вдоль направляющей цилиндра так, что в каждой точке поверхности выполняется условие Вульфа–Брэгга $2d \sin \theta = \lambda$, где d — период многослойной структуры, θ — угол скольжения излучения, а λ — длина волны излучения. Наиболее широко такие зеркала стали использоваться для коллимации и фокусировки жесткого рентгеновского излучения при $\lambda \approx (0.05\text{--}0.25 \text{ nm})$ от линейных анодов рентгеновских трубок. Применение таких зеркал позволило увеличить эффективность отбора излучения рентгеновской трубки более чем на порядок. В настоящее время такими зеркалами оснащаются практически все современные дифрактометры, приборы рентгенофлуоресцентного анализа и другая рентгеновская аппаратура технического и научного направления.

Широко используемой парой материалов для зеркал Гебеля является W/Si [2,3]. Эти зеркала обладают относительно высокими (выше 70%) коэффициентами отражения на длине волны 0.154 nm (излучение CuK_α). Однако при использовании таких структур проявляется квазибрэгговское рассеяние линии CuK_β с $\lambda = 0.139 \text{ nm}$, предсказанное теоретически в работе [4] и наблюдавшееся ранее экспериментально [5]. Этот эффект связан с интерференционным усилением интенсивности рассеянных волн от коррелированных интерфейсов. Когерентное повторение шероховатых границ раздела от слоя к слою приводит к резонансному усилению диффузного рассеяния рентгеновского излучения, генерируя так называемую квазибрэгговскую полосу при модифициро-

ванном условии Вульфа–Брэгга

$$\lambda = d(\sin \theta_{\text{in}} + \sin \theta_{\text{sc}}) = 2d \sin \theta_{\text{Br}}, \quad (1)$$

где λ — длина волны рентгеновского фотона, d — период многослойного рентгеновского зеркала, θ_{in} и θ_{sc} — углы скольжения и рассеяния соответственно, θ_{Br} — угол Брэгга. Выражение (1) есть условие возникновения дифракционного максимума при рассеянии на решетке, обратный вектор которой совпадает с обратным вектором многослойного рентгеновского зеркала. То есть возникновение квазибрэгговского рассеяния связано с тем, что шероховатость, воспроизводясь от слоя к слою, образует „решетку“.

Рассмотренное явление может привести к некорректной идентификации дополнительных пиков, которые появятся при дифрактометрических измерениях. Поэтому встает закономерный вопрос о подавлении линии излучения CuK_β .

В большинстве случаев при использовании рентгеновских трубок в качестве источников рентгеновского излучения эта проблема легко решается использованием фильтра, который изготавливается из более легкого, ближайшего к используемому в рентгеновской трубке, материалу анода. Например, для Cu — это Ni. Линия поглощения Ni — $\lambda = 0.149 \text{ nm}$. Таким образом, этот материал обладает высоким пропусканием при $\lambda > 0.149 \text{ nm}$ и низким пропусканием при $\lambda < 0.149 \text{ nm}$. То есть при работе с анодом на основе Cu этот шаг может обеспечить подавление интенсивности CuK_β -линий. Расчеты показывают, что степень подавления может достигать двух порядков. Однако вместе с подавлением паразитного излучения фильтр будет приводить к падению интенсивности полезного сигнала. Кроме того, использование свободновисящего фильтра приводит к усложнению схемы прибора и к некоторым сложностям в эксплуатации: фильтры довольно хрупкие, поскольку представляют собой пленки толщиной порядка 100 nm.

Поэтому вместо введения фильтров стоит рассмотреть вариант замены отражающего покрытия на основе пары материалов W/Si.

Поскольку никель обладает характеристиками, позволяющими подавлять линию излучения CuK_β , перспективными для рассматриваемых задач выглядят многослойные рентгеновские зеркала на основе этого материала. Например, Ni/Si, Ni/C, $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ /Si и $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ /C. Здесь в качестве оптически контрастных материалов по отношению к никелю выбраны достаточно прозрачные в рассматриваемом диапазоне длин волн „легкие“ материалы — кремний Si и углерод C. Запись $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ соответствует сплаву никеля и молибдена (80% никеля на 20% молибдена).

На рис. 1, *a* представлены результаты расчетов коэффициентов отражения в первом порядке дифракции от соответствующих структур с идеально гладкими и резкими границами раздела материалов. Периоды зеркал при расчетах $d = 4 \text{ nm}$, число периодов в структурах $N = 100$. Расчеты выполнены в программе „Multifitting“ [6] с использованием оптических констант из базы данных CXRO [7].

Существующие методы синтеза многослойных структур, в частности магнетронное напыление, не позволяют добиться идеальных границ раздела. На практике химическое взаимодействие и диффузия атомов материалов снижают оптический контраст в многослойной структуре, а значительные межслоевые шероховатости приводят к диффузному рассеянию излучения. Оба этих эффекта негативно сказываются на отражательной способности многослойного рентгеновского зеркала. Поэтому возникает интерес к исследованию реальных границ раздела заявленных структур.

Многослойные зеркала на основе Ni/C и Ni/Si изучались, например, в работах [8–10]. Однако здесь основное внимание уделялось отражательным и другим свойствам этих зеркал в мягком рентгеновском диапазоне. Тем не менее авторам удалось установить величины межслоевых шероховатостей (порядка 0.25–0.30 nm), на основе которых можно выполнить теоретическое предсказание отражательных свойств этих зеркал в жестком рентгеновском диапазоне.

В настоящей работе изучаются отражательные свойства и структурные характеристики многослойной структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ /Si. Выбор определяется свойствами сплава $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$. В отличие от чистого Ni, его сплав с Mo (при 20% молибдена) не является магнитным. Это важно для случая магнетронного напыления структур, поскольку немагнитная мишень не искажает магнитного поля магнетронов и соответственно типичного распределения потока вещества над мишенью. Ранее такие структуры не исследовались.

К вопросу о подавлении линии CuK_β строились теоретические спектральные зависимости отражательной способности для зеркал W/Si и $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ /Si (рис. 1, *b*) в программе „Multifitting“. Несмотря на сопоставимое

отражение на линии CuK_α (84.6%), в случае с W/Si отражение линии CuK_β в 4.5 раза выше, чем у $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ /Si.

1. Методика эксперимента

В ходе экспериментов многослойные структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ /Si синтезировались методом магнетронного напыления при постоянном токе на установке, оснащенной двумя магнетронами. Круглые магнетроны планарного типа имеют зону эрозии диаметром 110 mm. Перед технологическим процессом давление остаточных газов в камере находилось на уровне 10^{-6} mbar . В качестве рабочего газа использовался высокочистый (99.998%) аргон, давление которого в процессе напыления составляло $(1.0–1.3) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$. Питание магнетронов обеспечивалось источниками стабилизированного тока, разработанными в ИФМ РАН. На протяжении всего процесса значения токов составляли 300 mA для $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ и 400 mA для Si. При этом скорости роста пленок обеспечивались на уровне 0.12 nm/s для $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ и 0.07 nm/s для Si.

Для получения относительно высоких коэффициентов отражения от многослойной структуры в рентгеновском диапазоне среднеквадратичные межслоевые шероховатости исходных поверхностей должны быть на уровне $\sigma \approx (0.1–0.3) \text{ nm}$ и ниже. В нашем исследовании в качестве подложек использовались стандартные для микронной промышленности плоские кремниевые подложки ($\sigma \approx 0.2 \text{ nm}$) размером $25 \times 25 \text{ mm}$, предварительно вырезанные из цельной круглой пластины диаметром 100 mm и толщиной 0.46 mm. Подложки крепились вертикально на держатель, который в процессе напыления совершал возвратно-поступательное движение над магнетронами. Изменение скорости прохождения держателя над магнетронами позволяло регулировать толщину слоя, наносимого на подложку за один проход. Таким образом осуществлялось послойное нанесение материалов.

Как правило, поток распыляемого вещества с поверхности мишени неравномерен. Максимум плотности потока располагается над центром круглой мишени. Поэтому для создания равномерных по площади покрытий между магнетронами и подложкой устанавливались прецизионные фигурные диафрагмы, щели которых позволяют регулировать распределение потока вещества на подложку. Конкретный вид прецизионных диафрагм для каждой мишени определялся экспериментально. В наших экспериментах равномерность пленок на поверхности подложки находилась на уровне 0.4%.

Измерения отражательных характеристик многослойных структур проводились на четырехкристиальном лабораторном дифрактометре PANalytical X'Pert PRO MRD, который позволяет применить метод малоугловой рентгеновской рефлектометрии. Образец устанавливался на столик с шестью степенями свободы. Источником рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda = 0.154 \text{ nm}$

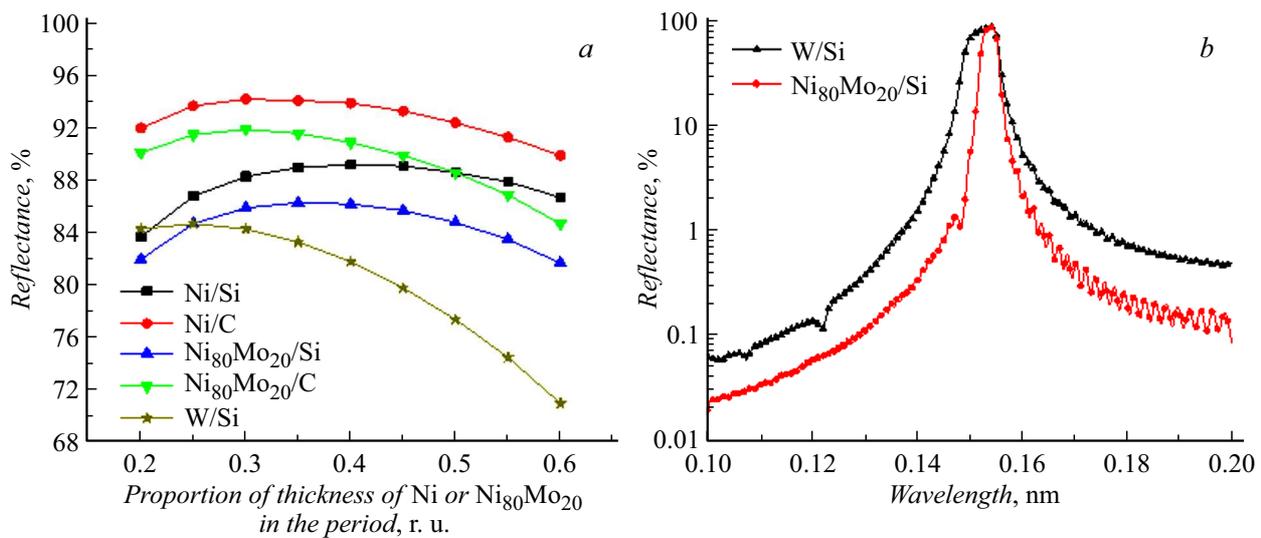


Рис. 1. Расчетные коэффициенты отражения в первом порядке дифракции на $\lambda = 0.154$ nm Ni-содержащих зеркал в зависимости от толщины Ni (a) и спектральные зависимости для W/Si и Ni₈₀Mo₂₀/Si при доле W и Ni₈₀Mo₂₀ в периоде $\beta = 0.25$ (b).

(линия CuK α) служила рентгеновская трубка. Рабочие параметры рентгеновской трубки были следующие: напряжение $U = 30$ kV, ток электронного пучка $I = 20$ mA. Спектральная и угловая монохроматизация зондового пучка осуществлялась с помощью четырехкристального асимметричного монохроматора Ge (220). Выходные щели далее за монохроматором ограничивали пучок в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Перед газовым пропорциональным детектором установлен держатель с коллиматором Соллера и входная щель.

Значения коэффициентов отражения, приведенные в настоящей работе, определялись как отношение интенсивности излучения (число фотонов в секунду), отраженного от зеркала, к интенсивности опорного сигнала. За счет достаточного времени экспозиции и малых статистических флуктуаций фотонов из источника и электронов в детекторе, мы можем говорить о погрешности определяемых значений коэффициентов отражения в $\pm 1\%$.

В силу различных физических процессов, происходящих в ходе напыления рентгеновских зеркал, границы раздела этой многослойной структуры не могут быть идеальными. Влияние межслоевой шероховатости и перемешивания (диффузии и химического взаимодействия материалов) приводит соответственно к рассеянию излучения и уменьшению резкости профиля диэлектрической проницаемости и, как следствие, к снижению отражательной способности зеркала. При этом важно понимание, за счет какого именно параметра произошло это снижение, поскольку от этого в дальнейшем зависит выбор метода улучшения интерфейсов, подавляющего развитие либо шероховатостей, либо перемешивания. Поэтому для разделения вкладов межслоевой шероховатости и перемешивания материалов проводились

измерения угловых зависимостей коэффициентов зеркального отражения и диффузного рассеяния.

Для получения кривой зеркального отражения образец юстировался так, чтобы рентгеновский пучок делился пополам. Это угловое положение принималось за нулевое. Источник излучения оставался неподвижным, а детектор, поворачиваясь с угловой скоростью, в два раза большей, чем образец, регистрировал интенсивность отраженного образцом излучения.

Кривые диффузного рассеяния получали следующим образом: образец и детектор устанавливали относительно неподвижного источника излучения на угол, соответствующий первому брэгговскому пику, после чего измеряли интенсивность рассеянного излучения при различных углах поворота образца. В этом случае положение детектора оставалось фиксированным.

Параметры рентгеновских зеркал (периоды, толщины слоев материалов и перемешанных областей, а также межслоевые шероховатости) определялись методом подгонки кривых зеркального отражения и диффузного рассеяния с использованием программы для рефлектометрической реконструкции многослойных структур „Multifitting“, разработанной в ИФМ РАН. Она позволяет проводить расчет спектральных и угловых зависимостей коэффициента отражения от смоделированной структуры путем решения системы рекуррентных соотношений, а также осуществлять одновременную подгонку нескольких экспериментальных кривых, снятых в различных спектральных диапазонах.

Для расчета шероховатости границ использовалась линейная модель роста [11], в рамках которой функция спектральной плотности мощности (PSD-функция) интерфейсов частично наследуется от предыдущих, а

частично заменяется на ростовую:

$$\text{PSD}_{2D}(\nu) = \text{PSD}_{\text{sub}}(\nu) \exp(-b(\nu)h) + \Omega \left[(1 - \exp(-b(\nu)h)) / \exp(-b(\nu)h) \right], \quad (2)$$

где ν — пространственная частота, $\text{PSD}_{\text{sub}}(\nu)$ соответствует подложке, $\exp(-b(\nu)h)$ — фактор наследования, $b(\nu)$ — функция поверхностной релаксации, которая представляется в виде полинома по степеням пространственной частоты, h — толщина слоя, Ω — объем падающих во время роста частиц (атомов, молекул или кластеров). Модель ABC [12] была выбрана в качестве модели, описывающей PSD-функцию подложки в формуле (2). В этом случае она описывается следующим выражением:

$$\text{PSD}_{\text{sub}}(\nu) = 4\pi\sigma^2\alpha / (1 + \xi^2(2\pi\nu)^2)^{\alpha+1}, \quad (3)$$

где σ — общая среднеквадратичная высота шероховатости подложки, для частот от 0 до $+\infty$, α — фрактальная размерность, определяющая скорость спада спектра в высокочастотную область, ξ — поперечная (вдоль слоя) корреляционная длина. Значение межслоевой шероховатости слоев получали после подстановки (3) в PSD-функцию интерфейсов и ее интегрирования в заданном диапазоне пространственных частот, который определялся из условия $2\pi\nu = k(\cos\theta_0 - \cos\theta)$, где ν — значение пространственной частоты, θ_0 — угол, соответствующий зеркальному отражению, θ — угол рассеяния, а k — волновое число. Значение угла рассеяния, близкое к положению пика Брэгга, выбиралось для получения нижней границы интегрирования, а значение, соответствующее максимальному углу рассеяния, выбиралось для получения верхней границы.

2. Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований производился поиск оптимальных параметров структуры, при которых достигалась их наилучшая отражательная способность. Для этого синтезировался ряд структур $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с разным соотношением толщин слоев материалов. При этом число периодов и саму величину периода мы старались сохранять неизменными. За основу были взяты типичные для зеркал Гебеля значения периодов в крайних точках: $d \approx 41.5$ и 33.5 \AA . Они соответствуют углам скольжения $\theta \approx 1.106$ и 1.355° при длине зеркала 40 mm , расстоянию от центра зеркала до линейного фокуса рентгеновской трубки 100 mm и уравнении направляющей цилиндра $y = (0.179x)^{0.5}$, $80 < x < 120$. После напыления производились измерения на дифрактометре.

По результатам подгонки в программе „Multifitting“ кривых зеркального отражения в таблицу занесены параметры синтезированных зеркал $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$: период (d), коэффициент отражения в первом брэгговском порядке дифракции (R), число периодов (N), доля толщины

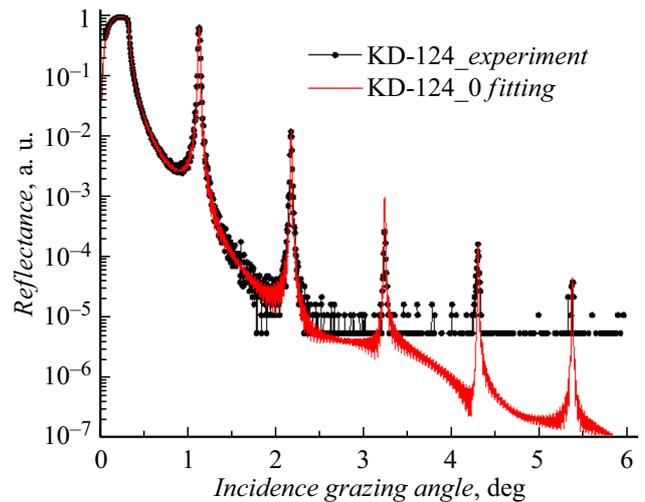


Рис. 2. Подгонка кривой зеркального отражения под экспериментальные данные для образца KD-124.

$\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде (β), $\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$ и $\sigma(\text{Si})$ — среднеквадратичная толщина переходной области (область перемешивания материалов и шероховатостей границ раздела слоев) на слоях $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ и Si соответственно.

Пример экспериментальной и расчетной кривой зеркального отражения от образца KD-124 представлен на рис. 2. Можно отметить хорошее совпадение экспериментальных данных отражения и результатов подгонки для модельной структуры.

Из таблицы видно, что значения толщин переходных областей на слоях Si больше, чем на слоях $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$. Некоторый разброс в полученных данных σ следует отнести на счет ошибки фиттинга. Тем не менее в среднем $\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$ приближенно равно 5 \AA , а $\sigma(\text{Si})$ — 8.5 \AA . Возможно, такую разницу можно объяснить баллистическим эффектом. То есть более тяжелые атомы Ni и Mo , бомбардируя слой Si , проникают на большую глубину. Однако на данном этапе остается неясным, что вносит основной вклад в переходную область — межслоевая шероховатость или перемешивание.

С учетом восстановленных толщин интерфейсов в таблице теоретические модели кривых зеркального отражения были подогнаны под один период $d = 41.50 \text{ \AA}$. Этот шаг был сделан для более корректного сравнения значений коэффициента отражения в первом порядке дифракции. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента отражения в первом брэгговском пике в зависимости от доли толщины слоя $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде. Для сравнения на этом же рисунке приведены расчетные значения коэффициентов отражения в случае идеально гладких резких границ раздела структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$.

Из графика на рис. 3 можно заметить, что оптимальное с точки зрения максимизации коэффициента отражения отношение толщины слоя $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ к толщине периода находится в диапазоне $\beta \approx (0.36-0.42)$, что не противоречит и случаю идеальной структуры.

Параметры синтезированных многослойных структур $\text{PNi}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$

Образец	KD-121	KD-122	KD-123	KD-124	KD-125	KD-126	KD-127	KD-128
N	60	60	60	60	60	60	60	60
d , Å	41.24	42.20	43.60	41.28	43.33	40.93	42.86	42.68
β , а.у.	0.580	0.480	0.432	0.418	0.368	0.363	0.326	0.265
$\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$, Å	4.8	4.7	5.6	5.0	5.8	4.6	5.0	4.5
$\sigma(\text{Si})$, Å	11.2	9.7	8.1	8.7	8.4	8.8	8.8	9.9
R , %	32	58	62	62	65	62	64	62

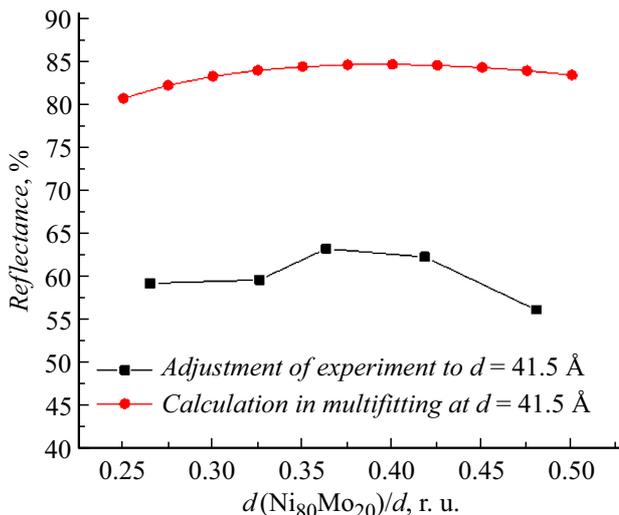


Рис. 3. Коэффициент отражения в первом порядке дифракции в зависимости от доли толщины слоя $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде $d = 41.50 \text{ \AA}$ структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$.

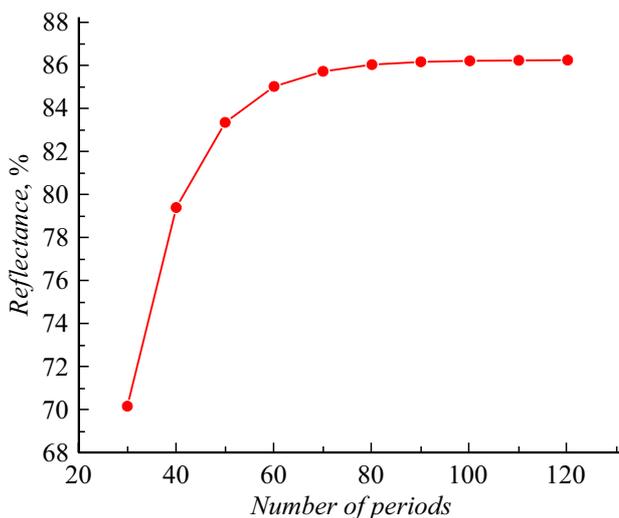


Рис. 4. Расчетная зависимость коэффициента отражения в первом порядке дифракции структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с периодом $d = 41.50 \text{ \AA}$ и долей $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде $\beta = 0.40$.

Для определения оптимального числа периодов в многослойной структуре $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$, необходимого и достаточного для получения максимального коэффици-

ента отражения, в программе „Multifitting“ проводилось моделирование структуры с идеально гладкими и резкими границами. За основу взята структура с периодом $d = 41.50 \text{ \AA}$ и долей $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде $\beta = 0.40$. На рис. 4 представлен график зависимости коэффициента отражения от числа периодов для заявленной структуры.

При количестве периодов $N \geq 100$ коэффициент отражения в первом порядке дифракции сохраняется на уровне 85.4%. Таким образом, сто периодов будет необходимым и достаточным условием для достижения лучшей отражательной способности. Эту величину важно определить с точки зрения технологической целесообразности. Конечно, можно напылить заведомо достаточное количество периодов, например, $N = 200$, чтобы гарантировать максимальный коэффициент. Однако большее число периодов означает большее время технологического процесса. Во время процесса возможен дрейф параметров (напряжения на магнетронах, давление рабочего газа в камере, температура мишени, подложки). Дрейф параметров приведет к дрейфу периода и к снижению коэффициента отражения. Поэтому важно заранее определить оптимальное количество периодов структуры.

Исходя из данных моделирования, была синтезирована многослойная структура $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с числом периодов $N = 100$ и $d \approx 41.50 \text{ \AA}$. Кривая зеркального отражения представлена на рис. 5, а. Отдельно на рис. 5, б представлен первый порядок дифракции, измеренный с большей точностью.

После подгонки по данным на рис. 5 определены структурные и отражательные характеристики зеркала: период $d = 42.04 \text{ \AA}$, доля $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде $\beta = 0.401$, среднеквадратичные толщины переходных областей $\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}) = 4.33$ и $\sigma(\text{Si}) = 9.87 \text{ \AA}$, коэффициент отражения в первом брэгговском пике $R = 69.5\%$. Таким образом, тенденция $\sigma(\text{Si}) > \sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$ сохранялась, а коэффициент отражения при оптимальных параметрах достигал почти 70%. Судя по модели спектральной зависимости этой структуры, построенной в „Multifitting“, отражение излучения CuK_β при данном угле составляло $R = 0.2\%$. Аналогичные модели синтезированных W/Si -структур при периоде $d \approx 40 \text{ \AA}$ давали коэффициенты отражения линий CuK_α и CuK_β при заданном угле $R = 71$ и 1% соответственно. То есть подавление CuK_β в 5 раз сильнее у структуры на основе $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$.

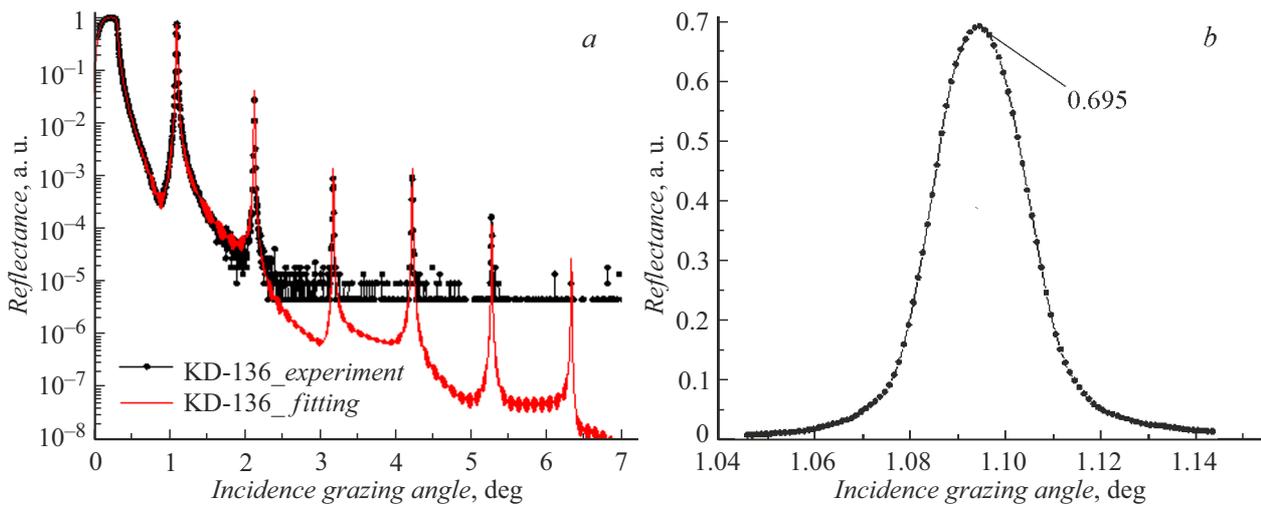


Рис. 5. Кривая зеркального отражения (a) и первый порядок дифракции (b) многослойной структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с числом периодов $N = 100$ и периодом $d = 42.04 \text{ \AA}$.

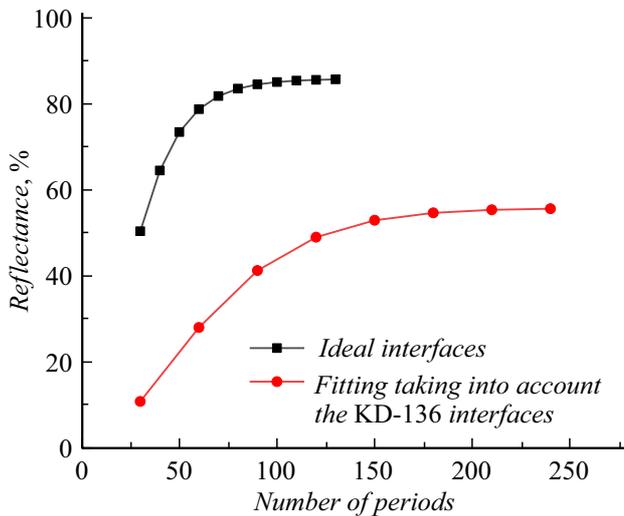


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения в первом порядке дифракции от числа слоев структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с периодом $d = 33.5 \text{ \AA}$.

Далее встал вопрос синтеза зеркала $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с периодом $d \approx 33.5 \text{ \AA}$ (другое крайнее значение периодов на параболу для зеркала Гебеля). Для этой структуры были построены модели кривых отражения с учетом толщин интерфейсов, восстановленных у зеркала с периодом $d = 42.04 \text{ \AA}$, а также при условии идеальных границ раздела. После этого строился график зависимости $R(N)$ (рис. 6).

Для зеркала с периодом $d = 33.5 \text{ \AA}$ и идеально гладкими резкими границами $N = 100$ периодов будет необходимым и достаточным условием для получения лучших отражательных характеристик. Однако, учитывая реальные довольно большие значения переходных областей, число периодов, судя по графику на рис. 6, придется

увеличить до $N = 200$. Это связано с увеличением глубины экстинкции (т.е. проникновения излучения вглубь структуры). Наличие шероховатостей приводит к уменьшению отражения на каждой границе. Соответственно излучение проникает в структуру дальше, чем в случае идеальных границ. Происходит увеличение отражающих слоев.

Кривая зеркального отражения для структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с $N = 200$ и $d \approx 33.5 \text{ \AA}$ представлена на рис. 7, a. Отдельно на рис. 7, b представлен первый порядок дифракции, измеренный с большей точностью.

После подгонки по данным на рис. 7 определены структурные и отражательные характеристики зеркала: период $d = 32.09 \text{ \AA}$, доля $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ в периоде $\beta = 0.417$, среднеквадратичные толщины переходных областей $\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}) = 6.40$ и $\sigma(\text{Si}) = 14.18 \text{ \AA}$, коэффициент отражения в первом брэгговском пике $R = 56.1\%$. Судя по модели спектральной зависимости этой структуры, построенной в „Multifitting“, отражение излучения CuK_β при данном угле составляло $R = 0.03\%$. Аналогичные модели синтезированных W/Si -структур при периоде $d \approx 30 \text{ \AA}$ давали коэффициенты отражения линий CuK_α и CuK_β при заданном угле $R = 69$ и 0.2% соответственно. То есть подавление CuK_β в 6.5 раз сильнее у структуры, на основе $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$.

Значения толщин переходных областей у всех синтезированных структур остаются довольно большими, что негативно сказывается на их отражательной способности. Важно узнать, какой именно параметр влияет на толщину переходных областей — среднеквадратичная шероховатость границ раздела или перемешивание материалов. Это может помочь в дальнейшем при выборе метода синтеза структур для улучшения интерфейсов, который будет подавлять развитие того или иного параметра.

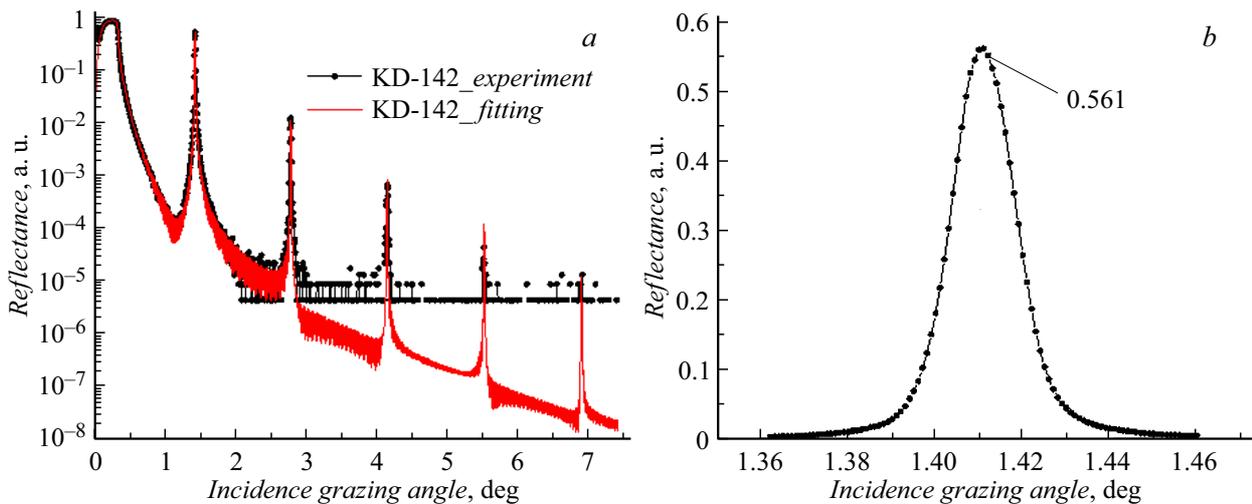


Рис. 7. Кривая зеркального отражения (а) и первый порядок дифракции (б) многослойной структуры $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с числом периодов $N = 200$ и периодом $d = 32.09 \text{ \AA}$.

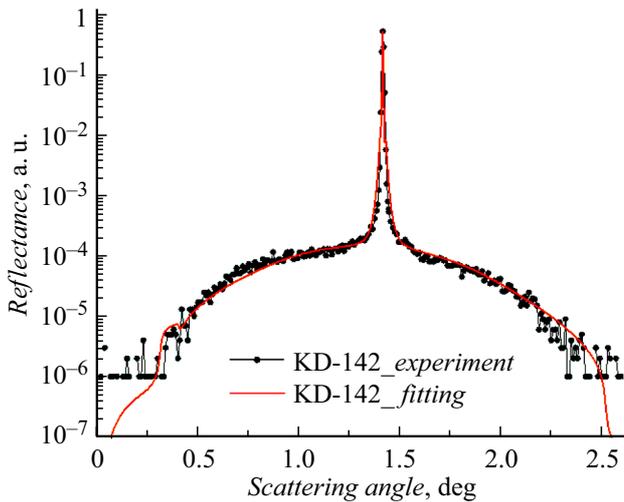


Рис. 8. Экспериментальная и расчетная кривая диффузного рассеяния в первом порядке дифракции для образца $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с периодом $d = 32.09 \text{ \AA}$.

Чтобы разделить эти вклады в переходную область для образца $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ с периодом $d = 32.09 \text{ \AA}$, снималась кривая диффузного рассеяния, приведенная на рис. 8.

Исходя из построенной в программе „Multifitting“ модели структуры, среднеквадратичные значения межслоевых шероховатостей на обеих границах $\sigma_e(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}) = \sigma_e(\text{Si}) = 0.35 \text{ \AA}$, т.е. основной вклад в переходную область вносило перемешивание.

Заключение

В ходе проведенной работы были установлены оптимальные структурные параметры, при которых отражательные характеристики многослойного рентгенов-

ского зеркала $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ имели лучшую отражательную способность в рамках данного технологического процесса напыления. При этом отношение толщины слоя $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}$ к толщине периода должно составлять $\beta \approx (0.36-0.42)$.

Толщины переходных областей для всех структур $\sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$ и $\sigma(\text{Si})$ находились на уровне ~ 5 и 8.5 \AA соответственно. При этом сохраняется тенденция $\sigma(\text{Si}) > \sigma(\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20})$. Среднеквадратичная межслоевая шероховатость на обеих границах была незначительной — $\sigma_e = 0.35 \text{ \AA}$. Основной вклад в толщину переходных областей вносит перемешивание слоев. Тем не менее отражательная способность многослойных структур $\text{Ni}_{80}\text{Mo}_{20}/\text{Si}$ сохранялась на приемлемом уровне ($R = 69.5-56.1\%$ для периодов $41.5-32 \text{ \AA}$), и в будущем встает вопрос о применении методов синтеза структур, подавляющих развитие перемешивания материалов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1362).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Schuster, H. Göbel. J. Phys. D: Appl. Phys., **28**, 270 (1995). DOI: 10.1088/0022-3727/28/4A/053
- [2] Э.П. Кругляков, А.Д. Николенко, Е.П. Семенов, Е.Д. Чхало, Н.И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 151 (1999).

- [3] D.L. Windt, F.E. Christensen, W.W. Craig, C. Hailey, F.A. Harrison, M. Jimenez-Garate, R. Kalyanaraman, P.H. Mao. *J. Appl. Phys.*, **88** (1), 460 (2000).
- [4] A.V. Andreev, A.G. Michette, A. Renwick. *J. Modern Opt.*, **35**, 1667 (1988).
- [5] O. Renner, M. Kopecký, E. Krouský, F. Schäfers, B.R. Müller, N.I. Chkhalo. *Rev. Sci. Instrum.*, **63** (1), 1478 (1992). DOI: 10.1063/1.1143047
- [6] M. Svechnikov. *J. Appl. Crystallogr.*, **53** (1), 244 (2020).
- [7] B.L. Henke, E.M. Gullikson, J.C. Davis. *Atomic Data Nucl. Data Tables*, **54** (2), 181 (1993).
- [8] H. Takenaka, T. Kawamura, H. Kinoshita. *Thin Solid Films*, **288** (1–2), 99 (1996). DOI: 10.1016/S0040-6090(96)08837-2
- [9] C. Sella, K. Youn, R. Barchewitz, M. Arbaoui, R. Krishnan. *Appl. Surf. Sci.*, **33–34**, 1208 (1988). DOI: 10.1016/0169-4332(88)90436-9
- [10] M. Cilia, J. Verhoeven. *J. Appl. Phys.*, **82**, 4137 (1997). DOI: 10.1063/1.366213
- [11] D.G. Stearns. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (15), 1745 (1993).
- [12] G. Palasantzas. *Phys. Rev. B*, **48** (19), 14472 (1993).