08

Структурные и отражательные характеристики Cr/C многослойных зеркал, полученных методом реактивного распыления

© Р.А. Шапошников, С.А. Гарахин В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., Россия
e-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2025 г.
В окончательной редакции 29 мая 2025 г.
Принято к публикации 29 мая 2025 г.

Приведены результаты исследования отражательных характеристик и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Cr/C, оптимизированных на спектральный диапазон длин волн 44–66 Å. Также приведены результаты исследования структур Cr/C, синтезированных в смеси газов „аргон + азот“.

Ключевые слова: многослойные рентгеновские зеркала, магнетронное распыление, рентгеновская микроскопия, окно прозрачности углерода, биологические исследования.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61243.123-25

Введение

Многослойные рентгеновские зеркала представляют собой поочередно нанесенные на подложку слои различных материалов. При этом период структуры может варьироваться в очень широких пределах: от нескольких ангстрем [1] до сотен ангстрем [2]. Данный факт выгодно отличает зеркала от кристаллов. Одним из главных законов, описывающих многослойные рентгеновские зеркала, является условие Брэгга-Вульфа:

$$2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda, \tag{1}$$

где d — период структуры, θ — угол скольжения излучения, λ — длина волны излучения, m — порядок брэгговского пика. Данное уравнение устанавливает связь между рабочей длиной волны и угловым положением максимума отражения m-го порядка. Так как для кристаллов период фиксирован, то для заданной рабочей длины волны оптическая схема может работать только под определенными углами. В то же время применение многослойных рентгеновских зеркал позволяет проектировать оптическую схему с большой степенью свободы для рабочей длины волны, так как период зеркала может быть выбран таким образом, чтобы обеспечить рабочий угол, наиболее подходящий для конкретной задачи. Так, в случае изображающей оптики, такой как рентгеновские телескопы [3], микроскопы [4], литографы [5] применяются зеркала нормального падения для обеспечения наилучшего разрешения исследуемых объектов. В других приложениях, таких как системы монохроматизации синхротронного излучения, где требуется обеспечить как можно более узкую ширину брэгговского пика, применяются зеркала скользящего падения [6]. Таким образом, выбор многослойных зеркал вместо кристаллов позволяет существенно упростить решение различных прикладных задач.

Одним из важных практических приложений многослойных рентгеновских зеркал является рентгеновская микроскопия, направленная на исследование биологических образцов. При этом для данной задачи перспективны различные спектральные диапазоны. Так, одним из диапазонов длин волн, представляющих интерес для рентгеновской микроскопии, является „водное окно“ [7]. Это диапазон длин волн от 2.3 до 4.4 nm, в котором кислород, являющийся поглощающим компонентом воды, обладает относительно малым поглощением рентгеновского излучения. При исследовании биологических объектов в данном диапазоне длин волн достигается высокий контраст между углеродосодержащими соединениями, такими, как, например, белки, и водой, что позволяет получать изображения с контрастом, приближающимся к контрасту, который достигается с использованием флуоресцентных красителей.

Другой важной спектральной областью для микроскопии биологических объектов является „окно прозрачности углерода“, длины волн 4.4–6.6 nm. Достоинства этого диапазона для гистологических исследований обсуждаются в [8]. Границы диапазона определяются следующим образом. На рис. 1 приведены зависимости действительной (δ) и мнимой (γ) частях показателя преломления n углерода и бора. Связь показателя преломления с параметрами δ и γ выражается следующей формулой:

$$n = 1 - \delta + i \cdot \gamma. \tag{2}$$

Исходя из представленных зависимостей видно, что коэффициент поглощения углерода резко падает при значениях длин волн больше 4.4 nm, что связано с наличием K-края поглощения углерода. В то же время на

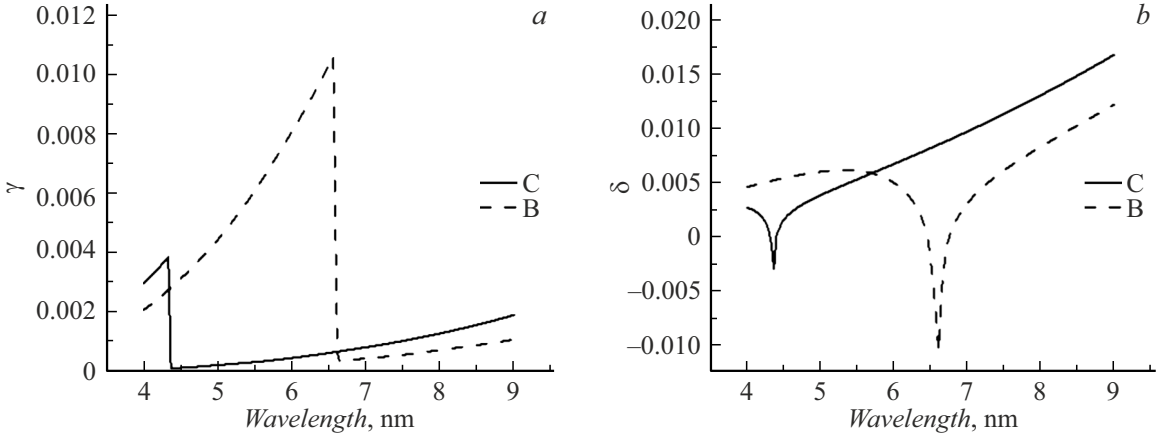

Рис. 1. Зависимость мнимой γ (a) и действительной δ (b) частей показателя преломления углерода (сплошная кривая) и бора (штриховая кривая).

длинах волн больше 6.6 nm еще меньшим поглощением обладает бор, что связано с наличием в данной области K-края поглощения бора. Таким образом, диапазон длин волн, ограниченный краями поглощения углерода и бора, называют окном прозрачности углерода, в котором данный материал обладает одной из наименьших величин поглощения. Настоящая работа посвящена исследованию многослойной структуры Cr/C, являющейся перспективной для данного диапазона длин волн.

Крайне важным является вопрос выбора материалов для многослойного зеркала. Общее правило выбора материалов звучит следующим образом [9]. Во-первых, выбирается материал, обладающий минимальным поглощением в спектральной области, на которую должно быть оптимизировано зеркало. Данный материал называют легким, а также спейсером или слабопоглощающим. В пару к нему выбирается материал, который в рабочей области длин волн обеспечивал бы, с одной стороны, хороший оптический контраст, т. е. большой скачок диэлектрической проницаемости по сравнению с первым материалом, а, с другой, обладал бы малым поглощением. Так как частота рентгеновского излучения значительно выше собственных частот большинства электронов в атомах, то фактически рентгеновское излучение взаимодействует с набором свободных электронов.

В качестве слабопоглощающего материала для многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на диапазон длин волн, соответствующий окну прозрачности углерода, следует выбирать углерод, так как именно он обладает наименьшим поглощением в данной спектральной области (рис. 1). В качестве сильнопоглощающего материала в пару к нему, как показывают расчеты, могут быть выбраны такие материалы, как никель, хром, кобальт. На рис. 2 приведен график зависимости коэффициента отражения многослойных рентгеновских зеркал на основе пар материалов Ni/C, Cr/C и Co/C от длины волны. Расчет был проведен для зеркал с рабочими углами скольжения 90°. Также в рамках

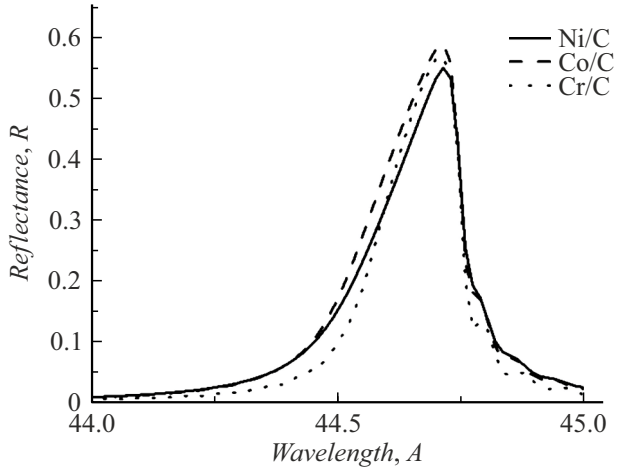

Рис. 2. Зависимости расчетного коэффициента отражения для идеальных структур с рабочими углами скольжения 90° на основе материалов Ni/C (сплошная кривая), Co/C (штриховая кривая) и Cr/C (пунктирная кривая).

проведенного расчета предполагалось, что структуры обладали нулевыми межслоевыми шероховатостями и табличными значениями плотностей материалов, т. е. расчет проводился для идеальных структур.

На представленных графиках видно, что теоретически наилучшее отражение имеют структуры на основе Cr/C и Co/C: $R = 56.9\,\%$ и $58.9\,\%$ соответственно. Таким образом, именно указанные выше пары материалов стоит считать перспективными для создания на их основе многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на работу в спектральном диапазоне 4.4–6.6 nm. Достоинством Cr/C зеркал является отсутствие магнитных свойств у Cr, что существенно упрощает их изготовление.

Стоит отметить, что ранее уже изучались многослойные рентгеновские зеркала на основе пар материалов

Cr/C различными исследовательскими группами. Так, в работе [10] были синтезированы структуры с периодом $d = 11.64$ nm. Число периодов при этом составляло величину $N = 20$. В рамках представленных в настоящей работе исследований было установлено, что при увеличении параметра β, который определяется как отношение толщины сильнопоглощающего материала в периоде к величине периода (в данном случае $\beta = d_{\mathrm{Cr}}/d$, где d_{Cr} — толщина слоев хрома, d — период многослойной структуры), наблюдается рост шероховатостей от 0.32 до 0.49 nm. Измерения образцов при этом проводилось в области жесткого рентгеновского излучения с энергией 8.04 keV. Также в настоящей работе показано, что синтезированные структуры обладают нулевым значением внутренних напряжений при значении $\beta = 0.45$. Также для структуры с $\beta = 0.37$ был измерен коэффициент отражения, который равнялся $R = 26.6\,\%$ при энергии излучения 1.04 keV. Величина внутренних напряжений такой структуры при этом составляла величину 261.72 MPa.

Наличие внутренних напряжений в структурах приводит к изменению их формы поверхности, что, в свою очередь, приводит к отклонению хода лучей от расчетного. Конкретно для величины 261 MPa у плоской кварцевой подложки диаметром 200 mm и толщиной 20 mm после напыления зеркала возникнет стрелка прогиба около 20 nm. Эта величина является довольно большой для оптики дифракционного качества, в которой допустимыми считаются среднеквадратичные отклонения формы поверхности не более чем $\lambda/14$, где λ — рабочая длина волны. Таким образом, при проектировании оптической схемы нужно учитывать наличие внутренних напряжений в многослойных структурах. Также в случае если величина внутренних превышает критическое значение, то отражающее покрытие может отслоиться от подложки.

1. Многослойные зеркала на основе Cr/C

В работе [11] были получены значения коэффициента отражения для многослойных рентгеновских зеркал на основе пар материалов Cr/C $R = 7.5\,\%$ при угле скольжения 85° и $R = 13.61\,\%$ для s-поляризованного излучения при угле скольжения 44°.

В работе [12] были синтезированы Cr/C многослойные рентгеновские зеркала со значением периода $d = 3.86$ nm, $\beta = 0.6$, $N = 100$. Коэффициент отражения составил величину $R = 21.8\,\%$ для s-поляризованного излучения с энергией 250 eV (длина волны — 4.96 nm) при угле скольжения 40.7°. Шероховатости слоев хрома и углерода имели значения: 0.4 и 0.32 nm соответственно.

В работе [13] были синтезированы Cr/C многослойные структуры с периодом $d = 9$ nm, $\beta = 0.33$ и числом периодов $N = 10$. На длине волны 4.48 nm был получен коэффициент отражения $R = 23\,\%$ при угле скольжения 14°. Значения шероховатостей для слоев хрома и углерода равнялись 0.42 и 0.26 nm соответственно.

В работе [14] были синтезированы Cr/C зеркала с периодами $d = 3.25$ nm, $\beta = 0.4$ и числом периодов $N = 150$. В работе был получен коэффициент отражения $R = 18.9\,\%$ на длине волны 6.42 nm и угле скольжения 88°. Значения межслоевых шероховатостей при этом составили 0.35 nm.

В работе [15] было получено значение коэффициента отражения $R = 7\,\%$ для Cr/C многослойных рентгеновских зеркал с величиной периода $d = 2.5$ nm и числом периодов $N = 110$ на длине волны 5 nm. Угол скольжения излучения при этом равнялся 78°. Восстановленные значения шероховатостей составили величину 0.35 nm.

В работе [16] были синтезированы многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов Cr/C со значением периода $d = 11.51$ nm, $\beta = 0.37$ и соответствующими толщинами слоев $d_{\mathrm{Cr}} = 3.25$ nm и $d_{\mathrm{C}} = 6.16$ nm. Величины переходных областей (межслоевых интерфейсов) при этом составили 1.3 nm для границы Cr-на-C и 0.8 nm для границы C-на-Cr. Синтезированные структуры облучали синхротронным излучением, а также нагревали до фиксированных температур. Облучение синхротронным излучением с плотностью мощности 0.1 W/mm^2 и энергией 1183.6 eV в течение 18 h привело к загрязнению поверхности: в месте, куда падал пучок, появилось пятно. При этом измерения отражательных характеристик в жестком рентгеновском диапазоне длин волн (энергия излучения $E = 8.04$ keV) не показали разницы для области, куда падал пучок, и вне ее. При этом измерение коэффициента отражения для излучения с энергией 1183.6 eV показало, что в облученной области коэффициент отражения был порядка 20 %, а вне пятна порядка 26 %. Также проводились измерения отражательных характеристик зеркал при энергиях падающего излучения от 1120 до 1400 eV при угле скольжения 87° и при энергиях от 900 до 1250 eV при угле 86.4°. Коэффициент отражения при отжиге возрос с $R = 27.9\,\%$ в первом случае и с $R = 21.6\,\%$ во втором случае на несколько процентов. После отжига при температуре 200 °C значения коэффициента отражения равнялись $R = 31.7\,\%$ и 25.6 % соответственно. При дальнейшем нагреве наблюдалось снижение коэффициента отражения. При отжиге при температуре 700 °C коэффициент отражения и значения коэффициента отражения были равны $R = 29.2\,\%$ и 22.4 %, однако это даже больше, чем было изначально. Данный эффект объясняется ростом плотности хрома и уменьшением плотности углерода. Таким образом, в настоящей работе продемонстрировано, что Cr/C зеркала обладают отличной температурной стабильностью и могут быть использованы в монохроматорах синхротронного излучения.

На данный момент самый высокий полученный экспериментально коэффициент отражения для Cr/C многослойных рентгеновских зеркал нормального падения

в окрестности края поглощения углерода был опубликован в статье [17] и равнялся $R = 15.4\,\%$ при угле скольжения излучения 81.62°. Измерения проводились на длине волны 4.47 nm.

Значения коэффициента отражения, полученные экспериментально для реальных структур, существенно ниже теоретического для идеальных структур. Существует несколько факторов, которые негативно сказываются на отражательных характеристиках. Во-первых, к таким факторам относится образование переходных областей на границах между слоями различных материалов, которые получаются в силу перемешивания, химического взаимодействия, а также взаимной диффузии атомов разных слоев. Этот эффект приводит к тому, что значение скачка диэлектрической проницаемости на границах многослойной структуры понижается, что, в свою очередь, ведет к ухудшению отражения от каждой границы, а, следовательно, структура в целом имеет меньший коэффициент отражения по сравнению с идеальной с абсолютно резкими границами. Во-вторых, помимо размытия границ, существует также эффект их искажения как целого, т. е. образование так называемых межслоевых шероховатостей. Они приводят к тому, что часть излучения рассеивается в углы, отличные от зеркального, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента отражения в направлении зеркального угла. Этот эффект также называется диффузным рассеянием. В-третьих, плотности материалов в тонких пленках, а также в многослойных структурах могут существенно отличаться от табличных значений. Данный факт может оказывать как положительное влияние на отражательные характеристики и приводить к увеличению коэффициента отражения, так и отрицательное и приводить к уменьшению коэффициента отражения. Отражение от каждой границы определяется скачком диэлектрической проницаемости, что для рентгеновского диапазона длин волн означает скачок электронной плотности. Таким образом, в случае, когда плотность легкого материала меньше табличной, оптический контраст увеличивается, а, следовательно, увеличивается коэффициент отражения. В случае если в многослойной структуре понижается плотность тяжелого материала, то оптический контраст, наоборот, ухудшается, и коэффициент отражения падает.

Для снижения влияния указанных эффектов в реальных структура применяют методики интерфейс-инжиниринга. Среди данных методик можно выделить 3 основных, наиболее часто применяемых для улучшения отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал. Во-первых, распространенным методом интерфейс-инжиниринга является пассивация слоев азотом. Данный метод заключается в следующем. Слои в структуре синтезируются в чистом аргоне. При этом после того, как слой материала был нанесен, в рабочий вакуумный объем напускается азот. Напуск азота прекращается до того, как начинается нанесение следующего слоя материала. Данный метод был успешно применен в ряде работ [18,19]. В частности, в [20] для многослойных структур на основе пары материалов Cr/Sc пассивация слоев хрома позволила получить рекордные значения коэффициента отражения $R = 23.8\,\%$ на длине волны 3.14 nm.

Другим хорошо развитым методом интерфейс-инжиниринга, связанным с применением азота, является так называемое реактивное распыление, которое заключается в синтезе многослойной структуры в смеси газов „аргон + азот“. Применение данного метода для структур вида LaN/B, оптимизированных на работу в окрестности длины волны 6.7 nm, позволило получить рекордный для данной спектральной области коэффициент отражения $R = 64.1\%$ при угле падения 1.5° от нормали на длине волны 6.65 nm [21].

Еще одним хорошо развитым методом интерфейс-инжиниринга является применение барьерных слоев, который заключается в нанесении тонких прослоек третьего материала в двухкомпонентную структуру. В качестве материала для барьерных слоев чаще всего используется углерод [22] и карбид бора [23–25].

В настоящей работе проводится изучение многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов хрома и углерода, а также исследуется влияние реактивного распыления материалов в смеси газов „аргон + азот“ на отражательные характеристики и структурные параметры Cr/C зеркал.

2. Методика эксперимента

Многослойные рентгеновские зеркала синтезировались методом магнетронного распыления на установке, оснащенной четырьмя магнетронами планарного типа [26]. Схема данной установки приведена на рис. 3.

Параметры магнетронного разряда имели следующие значения $I_{\mathrm{Cr}} = 360\,\mathrm{mA}$, $U_{\mathrm{Cr}} = 303\,\mathrm{V}$, $I_{\mathrm{C}} = 800\,\mathrm{mA}$, $U_{\mathrm{C}} = 302\,\mathrm{V}$. До начала синтеза проводилась откачка

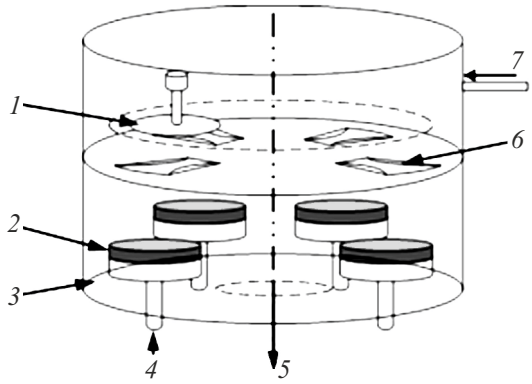

Рис. 3. Схематичное изображение установки магнетронного напыления для синтеза многослойных рентгеновских зеркал: *1* — подложка с двигателем, *2* — мишень, *3* — магнетрон, *4* — охлаждение, *5* — система откачки, *6* — фигурные диафрагмы, *7* — подача газа.

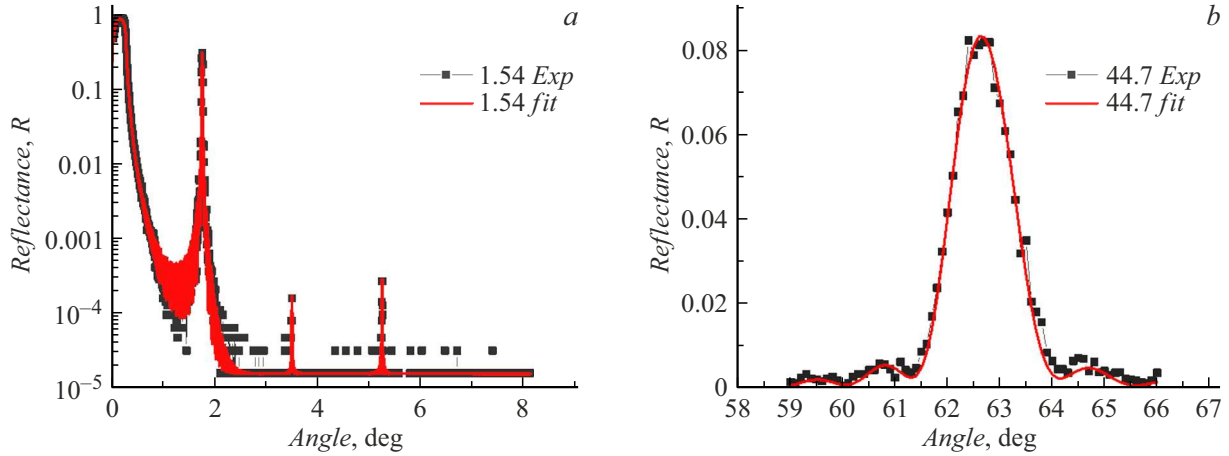

Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения многослойной структуры Cr/C от угла скольжения излучения на длинах волн 1.54 (*a*) и 44.7 (*b*). Кривые с точками соответствуют экспериментальным измерениям, сплошные кривые — подгонке.

остаточных газов из вакуумного объема до значения давления на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ Torr. В качестве рабочего газа был использован высокочистый (99.998 %) аргон. Давление рабочего газа в процессе синтеза находилось на уровне $1.3 \cdot 10^{-3}$ Torr. Напуск рабочего газа в вакуумный объем осуществлялся через специальный регулятор расхода газа, позволяющий осуществить стабильный во времени поток газа из баллона в вакуумный объем. Нанесение отражающего покрытия осуществлялось на кремниевые подложки со среднеквадратичным значением шероховатости на уровне 2 A. В процессе синтеза структуры подложка поочередно проходила над магнетронами, оснащенными мишенями хрома и углерода. Равномерное распределение потока вещества по латеральной координате обеспечивалось фигурными диафрагмами, располагающимися на специальных кожухах между мишенью и подложкой. Равномерность распределения по периоду по латеральной координате находится на уровне 0.5 толщин слоев осуществляется путем изменения скорости прохождения подложки над мишенью.

Напуск азота в вакуумный объем осуществлялся также, как и напуск аргона — через регулятор расхода газа (РРГ). Вариация степени открытия заслонки РРГ позволяет изменять парциальное давление азота в смеси газов „аргон + азот“. Также специально разработанное в ИФМ РАН программное обеспечение позволяет осуществлять как постоянный напуск азота, так и добавлять его в вакуумный объем в заданные моменты времени, в результате чего можно распылять в смеси газов как оба материала, так и отдельные слои.

Загрузка и выгрузка образцов из рабочего объема осуществляется с помощью специального вакуумного шлюза, отсеченного от рабочего объема затвором. Использование вакуумного шлюза очень важно по нескольким причинам. Во-первых, это позволяет сохранять высокий вакуум в основном объеме, что необходимо для получения высокоотражающих структур. Во-вторых, при напуске атмосферного воздуха в вакуумный объем требуется порядка суток для достижения давления остаточных газов на уровне 10^{-7} Torr. В то же время шлюзовая камера откачивается до высокого вакуума за времена порядка 30–40 min. Таким образом, в случае перезагрузки через основной вакуумный объем производительность была бы ограничена одним образцом в день. Использование вакуумного шлюза позволяет повышать производительность установки до 2–3 образцов в день. В-третьих, мишени химически активных материалов, таких как лантан, стронций, иттрий, бор начинают резко деградировать при контакте с атмосферой. Использование шлюзовой камеры для перезагрузки образцов позволяет избегать длительного контакта мишеней с атмосферой, что делает эксперименты с химически активными материалами в принципе возможным.

Питание магнетронов обеспечивается с помощью источников стабилизированного тока, разработанных в ИФМ РАН. Система управления установкой, программное обеспечение, а также пользовательский графический интерфейс разработаны в ИФМ РАН. Управление шаговым двигателем осуществляется путем подачи синхроимпульсов на драйвер шагового двигателя. Частота подачи синхроимпульсов определяет скорость прохождения подложки над мишенью распыляемого вещества. Управление расходом газа и турбомолекулярным насосом осуществляется путем отправки команд через интерфейс RS-485 в соответствие с протоколом обмена данными, установленным производителем оборудования.

Измерение зависимостей коэффициента отражения от угла скольжения излучения проводилось как в области жесткого рентгеновского излучения с длиной волны 1.54 Å на четырехкристальном дифрактометре Panalitical X'Pert PRO, так и на рабочей длине волны 44.7 Å на лабораторном рефлектометре, оснащенном монохроматором PCM-500 [27].

Восстановление структурных параметров синтезированных образцов проводилось с помощью программного обеспечения Multifitting [28], разработанного в ИФМ РАН. Данное программное обеспечение позволяет проводить одновременную подгонку нескольких экспериментально измеренных кривых зависимостей коэффициента отражения от угла скольжения излучения и от длины волны. На основании данной подгонки восстанавливаются такие структурные параметры, как период многослойной структуры, индивидуальные толщины слоев различных материалов в периоде, плотности материалов, а также величина межслоевых интерфейсов. Одновременная подгонка экспериментальных кривых, измеренных как в области жесткого, так и в области мягкого рентгеновского диапазона длин волн, позволяет восстанавливать структурные параметры с высокой точностью. При расчете кривых отражения используется метод рекуррентных соотношений. При этом переходная область на границах многослойной структуры задается линейной комбинацией функций с различными весовыми коэффициентами, что позволяет повысить качество проведенной подгонки. Пример такой подгонки приведен на рис. 4. Также в программе Multifitting присутствует возможность анализа кривых диффузного рассеяния, что позволяет определить величину геометрической шероховатости, приводящей к рассеянию падающего излучения в углы, отличные от зеркального.

3. Результаты и их обсуждение

На первом этапе экспериментов был проведен синтез многослойных рентгеновских зеркал нормального падения на основе пары материалов Cr/C в чистом аргоне с разной долей толщины хрома в периоде. Величина периода для всех образцов составляла $d = 25$ Å. Число периодов для каждой структуры равнялось $N = 80$. На рис. 5 приведена зависимость измеренного коэффициента отражения на длине волны 44.7 A от параметра β.

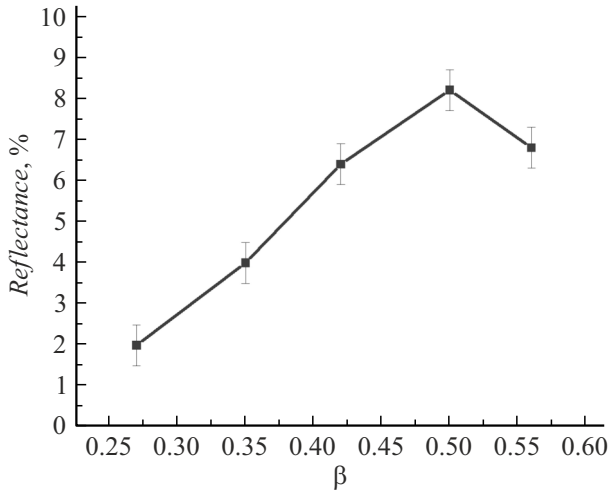

Рис. 5. Измеренная зависимость коэффициента отражения многослойных рентгеновских зеркал Cr/C от параметра β.

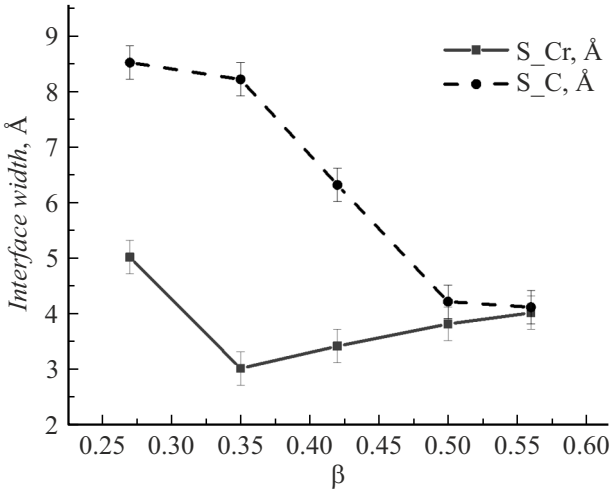

Рис. 6. Зависимость величины переходных областей от параметра β для границ хрома (сплошная кривая) и углерода (штриховая кривая).

Несмотря на то что теоретический расчет показывает, что оптимальное значение β с точки зрения получения максимального коэффициента отражения составляет порядка 0.4, экспериментальный оптимум находится в районе 0.5. Объяснением данного результата является тот факт, что с уменьшением доли хрома в периоде, начиная со значений $\beta = 0.5$, наблюдается резкий рост переходной области на границе Cr-на-C, что приводит к уменьшению коэффициента отражения зеркала. На другой границе, C-на-Cr, наблюдается слабое уменьшение переходной области с уменьшением доли хрома при резком росте, начиная со значений $\beta = 0.35$. График зависимости величины переходных областей от параметра β приведен на рис. 6. Далее была синтезирована структура на основе пары материалов Cr/C, числом периодов $N = 200$, величиной периода $d = 22.78$ A и значением $\beta = 0.5$. Коэффициент отражения такой структуры составил $R = 15\,\%$ на длине волны 44.7 Å.

На втором этапе экспериментов было проведено исследование отражательных характеристик и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал Cr/C, синтезированных в смеси газов „аргон + азот“. Период структур составлял $d = 25$ Å, величина параметра $\beta = 0.5$, число периодов составляло $N = 80$. На рис. 7 представлена зависимость плотности хрома от парциального давления азота в смеси газов. На рис. 8 представлена зависимость величины переходных областей на границах структуры от доли азота в смеси газов.

Из представленных зависимостей видно, что переходная область на границе C-на-Cr начинает уменьшаться при увеличении доли азота в смеси. Величина переходной области на границе Cr-на-C при этом не изменяется. Однако увеличение парциального давления

азота приводит также к уменьшению плотности слоев хрома в многослойной структуре, в результате чего оптический контраст на границах ухудшается. Таким образом, несмотря на то, что границы становятся более резкими при увеличении доли азота, общий коэффициент отражения структуры начинает падать. Следовательно, хром должен распыляться в чистом аргоне.

Исходя из вышесказанного были синтезированы структуры вида Cr/CN. Во время синтеза данных структур в рабочий объем осуществлялся постоянный напуск аргона. При этом азот добавлялся в камеру только во время прохождения подложки над мишенью углерода. Таким образом, слои хрома распылялись в чистом аргоне, а слои углерода — в смеси газов. На рис. 9

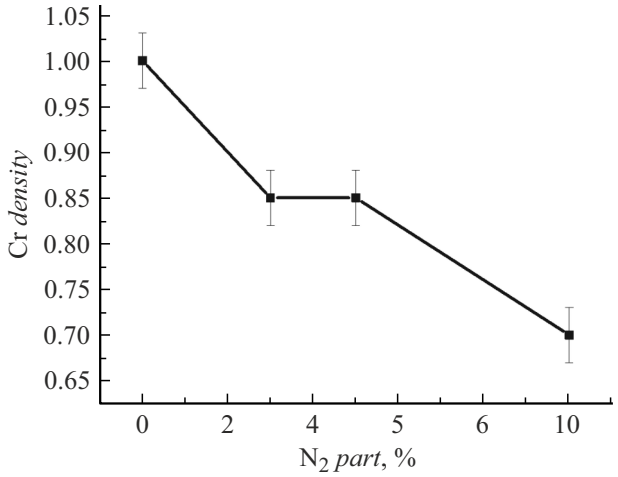

Рис. 7. Зависимость плотности хрома (значения приведены в долях относительно табличного значения металлического хрома) от парциального давления азота в смеси газов „аргон + азот“.

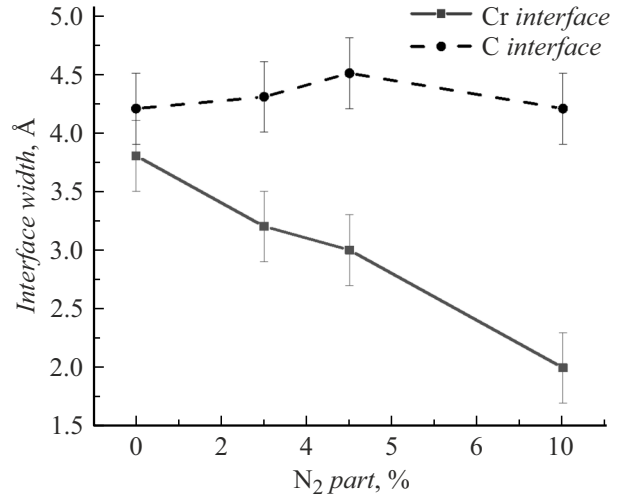

Рис. 8. Зависимость величины переходных областей хрома и углерода от парциального давления азота в смеси газов „аргон + азот“. Сплошная кривая соответствует хрому, штриховая — углероду.

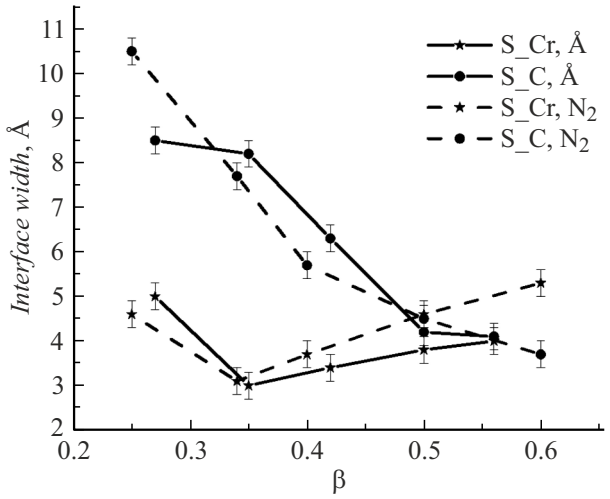

Рис. 9. Зависимости величины переходных областей хрома (кривые со звездами) и углерода (красные с кругами) для случая, когда структуры синтезировались в чистом аргоне (сплошные кривые), а также для случая, когда слои углерода синтезировались в смеси газов „аргон + азот“ (штриховые кривые).

приведены зависимости величины переходных областей от параметра β для случая, когда оба материала распылялись в чистом аргоне и для структур вида Cr/CN. Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что распыление в смеси газов не приводит к улучшению переходных областей.

Таким образом, можно сделать вывод, что реактивное распыление углерода не позволило увеличить коэффициент отражения относительно случая, когда азот не добавлялся в систему.

Заключение

В рамках проведенной работы были исследованы отражательные характеристики и структурные параметры многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Cr/C. Было установлено, что величина переходной области на границе Cr-на-C растет с уменьшением доли хрома в периоде при значениях $\beta < 0.5$. Таким образом, $\beta = 0.5$ является оптимальным для получения максимального коэффициента отражения. Коэффициент отражения полной структуры с числом слоев $d = 200$ и $\beta = 0.5$ составил при этом величину $R = 15\%$. Синтез обоих слоев структуры в смеси газов „аргон + азот“ приводит к уменьшению переходной области на границе C-на-Cr, а также к уменьшению плотности хрома. Негативный эффект от снижения оптического контраста при этом оказывается более весомым, в результате чего коэффициент отражения падает с увеличением парциального давления азота в смеси газов. При синтезе слоев хрома в чистом аргоне, а слоев углерода в смеси газов „аргон + азот“ величины переходных областей

не уменьшились по сравнению со случаем, когда оба материала распылялись в чистом аргоне. Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что интерфейс-инжиниринг, заключающийся в реактивном распылении материалов, не позволяет увеличить коэффициент отражения многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Cr/C.

Финансирование работы

Синтез и изучение в мягком рентгеновском диапазоне длин волн многослойных зеркал выполнен при поддержке гранта РНФ 21-72-20108-П, на длине волны 0.154 nm при поддержке гранта РНФ 21-72-30029-П.
Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ в ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Shaposhnikov, V. Polkovnikov, S. Garakhin, Yu. Vainer, N. Chkhalo, R. Smertin, K. Durov, E. Glushkov, S. Yakunin, M. Borisov. J. Synchrotron Rad., **31**, 268 (2024). DOI: 10.1107/S1600577524000419
[2] M. Fernandez-Perea, R. Soufli, J.C. Robinson, L.R. De Marcos, J.A. Mendez, J.I. Larruquert, E.M. Gullikson. Opt. Express, **20** (21), C24018 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.024018
[3] R. Falcone, C. Jacobsen, J. Kirz, S. Marchesini, D. Shapiro, J. Spence. Contemporary Phys., **52** (4), 293 (2011). DOI: 10.1080/00107514.2011.589662
[4] S.V. Shestov, A.S. Ulyanov, E.A. Vishnyakov, A.A. Pertsov, S.V. Kuzin. Astronomical Telescopes and Instrumentation, **9144**, 91443G (2014). DOI: 10.1117/12.2055946
[5] S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson. Jpn. J. Appl. Phys., **41**, 4074 (2002). DOI: 10.1143/JJAP.41.4074
[6] В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников, А.Д. Николенко. ЖТФ, **93** (7), 943 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55750.102-23
[7] Q. Huang, J. Fei, Y. Liu, P. Li, M. Wen, C. Xie, P. Jonnard, A. Giglia, Z. Zhang, K. Wang, Z. Wang. Opt. Lett., **41** (4), 701 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.000701
[8] И.А. Артюков, А.В. Виноградов, Ю.С. Касьянов, С.В. Савельев. Квантовая электроника, **34** (8), 691 (2004). DOI: 10.1070/QE2004v034n08ABEH002723
[9] А.В. Виноградов. *Зеркальная рентгеновская оптика* (Машиностроение, Л., 1989)
[10] J. Feng, Q. Huang, H. Wang, X. Yang, A. Giglia, C. Xie, Z. Wang. J. Synchrotron Rad., **26**, 720 (2019). DOI: 10.1107/S1600577519001668
[11] J.T. Zhu, B. Wang, Z. Zhang, H.C. Wang, Y. Xu, F.L. Wang, Z.S. Wang, L.Y. Chen, M.Q. Cui. X-Ray Lasers, 547 (2006), DOI: 10.1007/978-1-4020-6018-2_70
[12] M. Wen, L. Jiang, Z. Zhang, Q. Huang, Z. Wang, R. She, H. Feng, H. Wang. Thin Solid Films, **592**, 262 (2015). DOI: 10.1016/j.tsf.2015.06.005
[13] S. Deng, H. Qi, K. Yi, Z. Fan, J. Shao. Appl. Surf. Sci., **255**, 7434 (2009). DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.04.014
[14] H. Takenaka, S. Ichimaru, K. Nagai, T. Ohchi, H. Ito, E.M. Gullikson. Surf. Interface Anal., **37**, 181 (2005). DOI: 10.1002/sia.1959
[15] M. Niibe, M. Tsukamoto, T. Iizuka, A. Miyake, Y. Watanabe, Y. Fukuda. Intl Symp. Opt. Fabrication, Testing, and Surface Evaluation., (1992). DOI: 10.1117/12.132127
[16] J. Feng, Q. Huang, R. Qi, X. Xu, H. Zhou, T. Huo, A. Giglia, X. Yang, H. Wang, Z. Zhang, Z. Wang. Opt. Express, **27** (26), 38493 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.038493
[17] С.С. Андреев, М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, П.К. Гайкович, Д.Е. Парьев, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало. Кристаллография, **58** (3), 497 (2013). DOI: 10.7868/S002347611303003X
[18] D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, F. Bijkerk. J. Nanosci. Nanotechnol, **19** (1), 585 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.16476
[19] D. Xu, Q. Huang, Y. Wang, P. Li, M. Wen, P. Jonnard, A. Giglia, I.V. Kozhevnikov, K. Wang, Z. Zhang, Z. Wang. Opt. Express, **23** (26), 33018 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.033018
[20] R.M. Smertin, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, I.V. Malyshev, V.N. Polkovnikov. Opt. Express, **32** (15), 26583 (2024). DOI: 10.1364/OE.524921
[21] D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, R.W.E. van de Kruijs, E. Louis, F. Bijkerk. Opt. Lett., **40** (16), 3778 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.003778
[22] N.I. Chkhalo, S. Künstner, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, S.D. Starikov. Appl. Phys. Lett., **102**, 011602 (2013). DOI: 10.1063/1.4774298
[23] D.L. Windt, E.M. Gullikson. Appl. Opt., **54** (18), 5850 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.005850
[24] M. Wu, C. Burcklen, J.M. André, K.L. Guen, A. Giglia, K. Koshmak, S. Nannarone, F. Bridou, E. Meltchakov, S. de Rossi, F. Delmotte, P. Jonnard. Opt. Eng., **56** (11), 117101 (2017). DOI: 10.1117/1.OE.56.11.117101
[25] M. Prasciolu, A.F.G. Leontowich, K.R. Beyerlein, S. Bajt. Appl. Opt., **53** (10), 2126 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.002126
[26] И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, С.Д. Стариков, Л.А. Суслов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **7**, 37 (2013). DOI: 10.7868/S0207352813070202
[27] M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **543**, 333 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.01.251
[28] M. Svechnikov. J. Appl. Crystall., **53** (1), 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X