13

Зеркала для двухзеркального монохроматора станции „Микрофокус“ синхротрона СКИФ

© Р.М. Смертин, Е.С. Антюшин, Ю.А. Вайнер, Е.И. Глушков, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603951 Афонино, Кстовский р-он, Нижегородская обл., Россия
e-mail: smertin_ruslan@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 23 апреля 2026 г.
Принято к публикации 23 апреля 2026 г.

Для двухзеркального монохроматора для станции 1-1 „Микрофокус“ синхротрона СКИФ изготовлена пара высокоточных и идентичных по параметрам трехстрипповых многослойных зеркал. Каждый стрипп был рассчитан на свой спектральный диапазон и требуемое спектральное разрешение, что позволило всего двумя зеркалами перекрыть диапазон энергий фотонов 10−30 keV. Подробно описана процедура осаждения отражающих многослойных покрытий. Определены отражательные и спектральные характеристики изготовленных зеркал.

Ключевые слова: многослойные рентгеновские зеркала, синхротронное излучение, рентгеновский монохроматор.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63623.125-26

Введение

В ИФМ РАН разработан двухзеркальный монохроматор (ДЗМ) для станции 1-1 „Микрофокус“ синхротрона „СКИФ“ [1]. ДЗМ служит для решения двух задач. Во-первых, он должен снимать тепловую нагрузку до 150 W с последующих рентгенооптических элементов станции: прорезного кристалла-монохроматора и системы нанофокусировки Киркпатрика–Баеза. Во-вторых, ДЗМ должен осуществлять монохроматизацию синхротронного излучения (СИ) в диапазоне энергий фотонов 10−30 keV и спектральное разрешение в диапазоне 0.5 %−2 %.

Высокая плотность мощности СИ, падающая на первое зеркало ДЗМ, приводит к термоиндуцированным деформациям подложки, что приводит к потерям фотонов на кристалле-монохроматоре. Для решения этой проблемы подложки ДЗМ были изготовлены по технологии „smart-cut“, обеспечивающей субмикрорадианную термоиндуцированную расходимость СИ [1].

Угловые ошибки зеркал не должны превышать значения 1 μrad. Такая точность была достигнута путем многоступенчатой схемы полировки. На первом этапе методом механического притира осуществлялась глубокая шлифовка–полировка с целью придания поверхности плоскостности на уровне 10 nm. На следующем этапе применялась химико-механическая полировка, обеспечивающая эффективную шероховатость в диапазоне пространственных частот 0.025−70 μm^{-1} на уровне 0.2 nm. Подробнее о методах изготовления и метрологии шероховатостей можно найти в [2–4]. На завершающем этапе изготовления подложек с использованием малоразмерного ионного пучка производилась коррекция локальных ошибок формы для достижения субмикрорадианного уровня ошибки формы. Оборудование и методика коррекции описаны в [5–10].

Во всем энергетическом диапазоне для реализации экспериментальных методик, планируемых к реализации на станции [11,12], требовался коэффициент отражения от двух зеркал не менее 50 %. При этом в диапазоне 10−19 keV спектральная селективность отражающих покрытий ($\Delta E/E$) при двукратном отражении должна быть не менее 1 %, а в диапазоне 19−30 keV состоять из двух вариантов — не менее 1 % и не более 0.5 %.

Широкая спектральная полоса позволяет сохранить большое число фотонов, что важно по следующим причинам. Во-первых, она позволяет возбуждать флуоресценцию и проводить быстрое картирование в методе микрорентгенофлуорисцентного анализа (μ-XRF). Во-вторых, высокая интенсивность СИ позволяет достигнуть нанометрового разрешения в птихографии в режиме „розового пучка“ (без использования кристалла-монохроматора).

Узкая спектральная полоса необходима для методик, чувствительных к высокому разрешению, например, микрорентгеновская спектроскопия (μ-XANES), в которой высокое разрешение необходимо для разделения близкорасположенных особенностей спектра.

Для диапазона 10−19 keV было предложено многослойное рентгеновское зеркало (МРЗ) Mo/Be, которое удовлетворяет всем требованиям. Для диапазона 19−30 keV были выбраны МРЗ на основе: Cr/Be для достижения $\Delta E/E \sim 0.5$ % при двукратном отражении и W/B_4C для $\Delta E/E \sim 1$ % при двукратном отражении [1].

Размер подложек, на поверхность которых осаждались отражающие МРЗ составляет 25 × 25 × 200 mm. Рабочий угловой диапазон — 0.5−0.95°.

Для упрощения конструкции и стоимости монохроматора отражающие зеркала наносились в виде трех стриппов на каждую подложку. Под понятием „стрипп“ подразумеваются узкие полосы, шириной ~ 6 mm на всю длину подложки ($\sim 6 \times 200$ mm). Такое решение стало возможным благодаря относительно малой высоте, на уровне 2.5 mm, падающего на зеркала синхротронного пучка.

В настоящей работе описываются подходы и методы к решению поставленной задачи. В частности, приводится обоснование выбранных типов МРЗ (Cr/Be, Mo/Be и W/B_4C), описывается способ как удалось достичь идентичности параметров стриппов на двух различных подложках. Приводятся данные по рентгенооптическим свойствам изготовленных МРЗ.

1. Методика эксперимента

МРЗ изготавливались методом магнетронного напыления при постоянном токе. Общая схема установки магнетронного напыления включает пост откачки, вакуумную камеру, блок электроники и персональный компьютер с установленной программой управления.

Остаточное давление газов в рабочей камере перед процессом осаждения пленок и отражающих покрытий не хуже $2.0 \cdot 10^{-5}$ Pa. МРЗ изготавливались в среде чистого Ar (99.998 %) при давлении ~ 0.1 Pa. Постоянное значение давления рабочего газа во время осаждения МРЗ и пленок материалов контролировалось при помощи регулятора расхода газа РРГ-12 и постоянным измерением значения давления газа вакуумным датчиком Pfeiffer PKR 251. РРГ-12 обеспечивает постоянный поток газа в камеру с высокой точностью. Регулятор имеет собственную систему обратной связи для поддержания постоянного значения потока при изменении внешних параметров — изменение входного давления газа в регулятор и изменение температуры.

Для подачи питания на магнетроны используются источники питания собственного производства ИФМ РАН. Нестабильность выходного тока в источниках питания не превышает 0.01 % при изменении сетевого напряжения на ± 10 % и также составляет порядка 0.01 %–0.02 % при изменении тока нагрузки в 10 раз. Значения подаваемого тока на магнетроны в данной напылительной установке могут варьироваться в пределах от десятков mA до 1.5 A, значения напряжений при этом находятся в пределах 100–400 V (в зависимости от распыляемого материала, от величины тока разряда, от давления рабочего газа в вакуумном объеме). Максимальный предел 1.5 A ограничен возможностью системы охлаждения магнетронов, а не источников питания. Охлаждение магнетронов осуществляется путем постоянной подачи охлажденной воды в трубки охлаждения внутри магнетронов с последующим выводом нагретой воды в систему охлаждения. Температура подаваемой воды составляет 14 °C. Охлаждение воды осуществляется с помощью промышленного холодильника (чиллер) ENR.002 производства HITEMA (Италия).

При синтезе отражающих МРЗ значения токов и напряжений на магнетронах, а также скоростей осаждения материалов составляли:

— для МРЗ Mo/Be: $I(\mathrm{Mo}) = 0.6$ A, $\upsilon = 0.04$ nm/s, $I(\mathrm{Be}) = 0.8$A, $\upsilon = 0.07$ nm/s;

— для МРЗ на основе Cr/Be (Si/Cr/Be): $I(\mathrm{Si}) = 0.54$ A, $\upsilon = 0.04$ nm/s, $I(\mathrm{Cr}) = 0.75$ A, $\upsilon = 0.12$ nm/s, $I(\mathrm{Be}) = 0.8$ A, $\upsilon = 0.07$ nm/s. Слои Si выступают в качестве буферного слоя малой толщины;

— для МРЗ W/B_4C: $I(\mathrm{W}) = 1.0$ A, $\upsilon = 0.08$ nm/s, $I(B_4C) = 1.5$ A, $\upsilon = 0.02$ nm/s.

При осаждении подслоя Y/Cr под отражающие МРЗ, значения токов и напряжений на магнетронах, а также скоростей осаждения материалов составляли: $I(\mathrm{Cr}) = 0.7$ A, $\upsilon = 0.09$ nm/s, $I(\mathrm{Y}) = 0.6$ A, $\upsilon = 0.11$ nm/s.

Измерения зеркального отражения рентгеновского излучения на энергии 8 keV (линия $\mathrm{CuK}_{\alpha 1}$) производились с использованием высокоразрешающего четырехкристального дифрактометра PANalytical Expert'Pro. Ширина зондового пучка 50 μm, угловая расходимость пучка около 0.005°, угловой размер приемной щели $\sim 0.2°$. Шаг сканирования при измерениях зеркального отражения: 0.005° вне брэгговских максимумов и 0.001° в окрестности брегговских максимумов.

Структурные параметры МРЗ (период, толщины слоев материалов, плотности слоев, состав слоев, значения ширин переходных областей и шероховатости межслоевых границ) определялись с использованием программного пакета Multifitting [13] по данным измерений зеркального отражения рентгеновского излучения на энергии 8 keV.

1.1. Расчет допустимого отклонения значения периода от целевого

Для достижения того, чтобы угол отражения от МРЗ на целевой энергии в каждой точке поверхности монохроматора был одинаков (одно значение угла отражения на всей поверхности), необходимо, чтобы в каждой точке на подложке было одинаковое значение периода отражающего покрытия. Для достижения этого перед осаждением отражающего покрытия на готовую подложку производится процедура выведения равномерности распределения толщин материалов. Под понятием „распределение“ подразумевается отличие в значении толщины отражающего покрытия в разных точках на подложке от наперед заданного значения (равномерного в нашем случае). Сведение распределения к заданному является необходимым условием при изготовлении многослойных рентгеновских зеркал.

Под понятием „необходимого уровня“ подразумевается максимально допустимое отклонение от абсолютно равномерного осаждения покрытия (отклонение — 0 %),

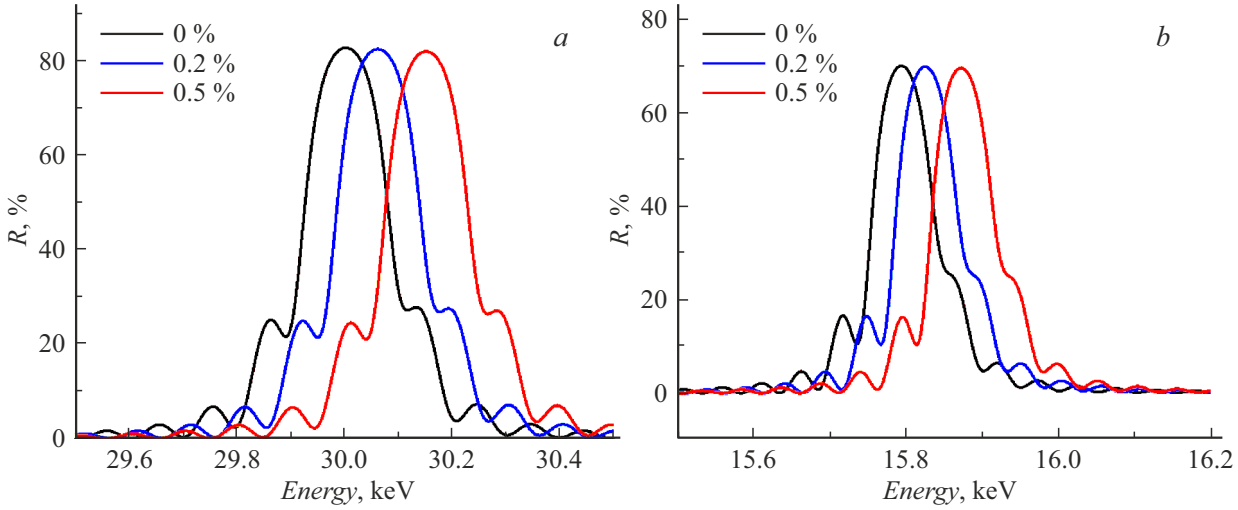

Рис. 1. Расчет спектрального отражения на углах 0.5° (*a*) и 0.95° (*b*) от МРЗ Cr/Be с разными значениями периода.

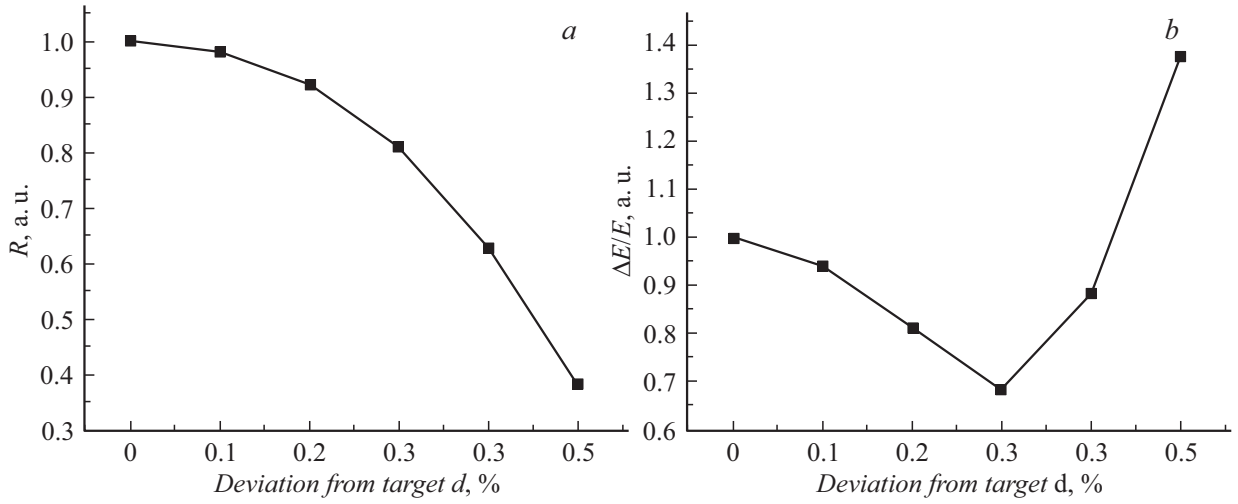

Рис. 2. Изменение интегрального коэффициента отражения (*a*) и спектральной ширины (*b*) от МРЗ Cr/Be в зависимости от отклонения значения периода *d* от целевого.

которое не приведет к значимым искажениям спектральных характеристик отраженного пучка — коэффициент отражения и энергетическое положение отличается незначительно от нулевого отклонения. Для определения минимально допустимого отклонения был проведен расчет двукратного отражения от МРЗ с отклонениями в периоде: 0 %, 0.1 %,. . . 0.5 %.

На рис. 1 приведен расчет спектральной зависимости коэффициента отражения на углах 0.5 и 0.95° от МРЗ Cr/Be с разными значениями периода (целевое значение периода — 0 %, и при отклонении значения периода от целевого).

Отклонение значения периода от целевого приводит к изменению интегрального отражения от всей поверхности подложки в целом. На рис. 2 приведен результат расчета изменения интегрального отражения при разных значениях отклонения периода от нулевого.

Из-за малой спектральной ширины отражения в МРЗ Cr/Be уже при отклонении периода от целевого на 0.2 %–0.3 % наблюдается значительное снижение отражения. Поэтому максимально допустимое отклонение от целевого значения периода для МРЗ Cr/Be не должно превышать 0.2 %.

Аналогично были рассчитаны допустимые отклонения от целевого значения периода для МРЗ Mo/Be и W/B_4C. В этих МРЗ из-за большей спектральной ширины отражения максимально допустимое отклонение периода не должно превышать 0.5 %.

1.2. Методика вывода равномерного распределения покрытия на подложку

Перед осаждением на подложки для монохроматора пленки отдельных материалов и МРЗ осаждались на

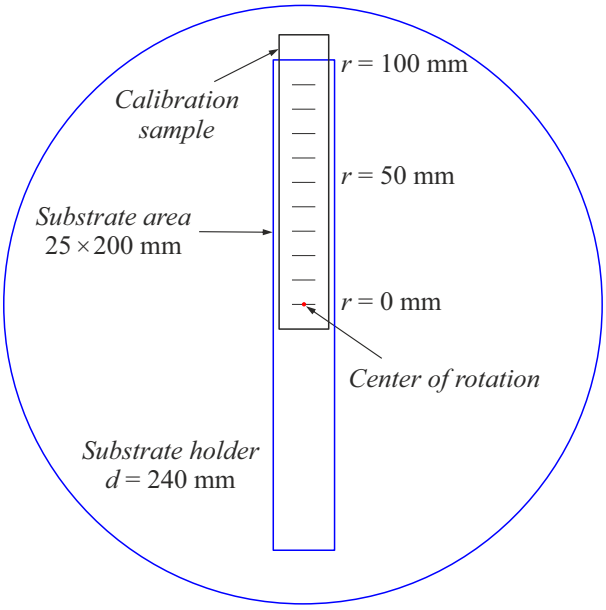

Рис. 3. Схема расположения калибровочной кремниевой платины на подложкодержателе напылительной установки относительно рабочей подложки.

гладкие (величина среднеквадратичной шероховатости ~ 0.2 nm) кремниевые подложки толщиной 450 μm. Исходный диаметр подложек 150 mm. Перед осаждением экспериментальных образцов МРЗ и пленок материалов подложки предварительно нарезались на кусочки размерами 25×120 mm. Такие размеры необходимы для предварительного вывода распределения осаждения пленок на подложку. После резки проводилась химическая чистка подложек от загрязнения.

В ходе процесса синтеза МРЗ и пленок материалов подложка крепится на подложкодержатель, расположенный над магнетронами. Подложкодержатель представляет собой дюралюминиевый диск диаметром 240 mm, толщиной 4 mm, прикрепленный через систему креплений к центральной оси напылительной установки. Вращение подложкодержателя вокруг своей оси позволяет получить центрально-осевую симметрию осажденного покрытия на подложке. Подложка на подложкодержателе осуществляет круговые движения по или против часовой стрелки относительно оси напылительной установки, последовательно проходя над работающими магнетронами. Толщины пленок материалов контролируются током разряда на магнетроне и временем нахождения подложки над магнетроном. Изменяя значения тока разряда и время прохождения, можно изменять скорость осаждения распыляемого материала на подложку.

Процедура получения заданного распределения толщины материалов носит итерационный характер. На первом этапе происходит напыление структуры на кремниевые калибровочные пластины (рис. 3). Так как линейный размер подложки 200 mm, то с учетом оси симметрии осажденного покрытия необходимо проводить измерения до значения радиуса $r = 100$ mm. Для этого размер подложек должен составлять ~ 120 mm или больше.

После напыления МРЗ или пленки на подложку производится определение периода МРЗ или толщины пленки по данным малоугловой рентгеновской дифракции в координатах: $r = 0$ mm, $r = 10$ mm,. . . и $r = 100$ mm. По результатам измерения определяются значения периода МРЗ или толщины пленки материала в зависимости от координаты. При необходимости, если значение периода МРЗ или толщины пленки не удовлетворяет заданному распределению, производится коррекция профиля фигурных диафрагм. Фигурные диафрагмы представляют собой „лепестки“ из нержавеющей стали, которые закреплены в области между распыляемой мишенью материала и подложкодержателем с прикрепленным образцом. Они позволяют изменять распределение осаждения материала МРЗ на подложку. Изменяя расстояние между „лепестками“ диафрагмы в определенных по результатам измерений точках, можно добиться необходимого распределение осаждения толщины материала на поверхности подложки.

1.3. Процедура осаждения МРЗ на подложки монохроматора

Две подложки для монохроматора имеют размеры $25 \times 30 \times 200$ mm. На лицевой поверхности (25×200 mm) необходимо осадить три разных отражающих МРЗ [1]: Cr/Be, Mo/Be и Mo/B_4C, которые обеспечивают монохроматизацию своего поддиапазона энергий. Ширина каждого МРЗ на подложке должна составлять ~ 6 mm. Схема расположения отражающих МРЗ на поверхности подложек приведена на рис. 4.

После вывода равномерного распределения осаждения материала на всю поверхность подложек (200 mm) необходимо „закрыть“ всю часть, кроме области $\sim 6 \times 200$ mm. Для обеспечения осаждения на нужной части подложки, были спроектированы и изготовлены металлические маски, которые оставляют открытую зону для осаждения покрытия ($\sim 6 \times 200$ mm), а остальную часть подложки закрывают собой. В связи с тем, что значение периода отражающего покрытия должно быть одинаково на обоих подложках, осаждение отражающего покрытия происходило на обе подложки одновременно. В этой связи маски проектировались и изготавливались таким образом, чтобы покрывать собой обе подложки одновременно и оставлять по одной отрытой зоне на каждой из подложек. Чертежи защитных масок приведены на рис. 5.

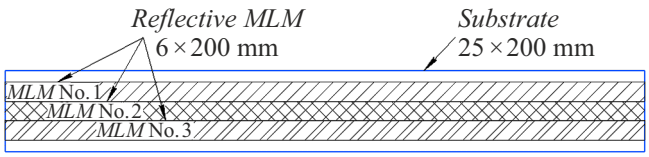

Рис. 4. Схема расположения отражающих МРЗ на поверхности подложек для монохроматора.

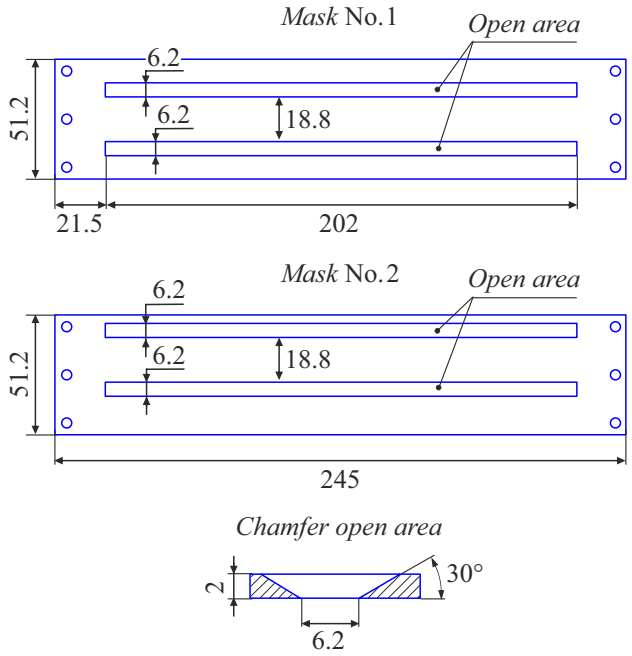

Рис. 5. Чертежи защитных масок.

Маска N 1 позволяет осаждать отражающее покрытие на центры подложек, а маска N 2 на края подложек. Осаждение на „верхний“ и „нижний“ края подложки осуществляется за счет поворота маски N 2 на 180°. В случае напыления покрытия через маски, которые имеют какую-то толщину, наблюдается эффект затенения. Под этим эффектом подразумевается отклонение толщины покрытия (в меньшую сторону) в области стенки маски. Такой эффект связан с тем, что осаждение покрытия осуществляется не строго перпендикулярно подложке, а в широком диапазоне углов. В таком случае, толщина маски выступает „стеной“, которая препятствует осаждению материала в окрестности „стены“. Для уменьшения затенения осаждения материала на поверхность подложек в окрестности открытых областей предусмотрены фаски. Совокупность выведенного равномерного осаждения материала на поверхность диаметром 200 mm и закрытие необходимых участков подложки позволило получить равномерное осаждение МРЗ на зону подложек размером $\sim 6 \times 200$ mm.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Осаждение подслоя Y/Cr на всю поверхность подложек

Для реставрации подложек (снятия осажденного покрытия, например, при необходимости удалить загрязнения на поверхности, не удаляемые иными способами, или в случае неудачного напыления) на их поверхность перед осаждением основного отражающего МРЗ наносился подслой. Подслой состоит из материала, который можно химически растворить без повреждения материала подложки. Обычно для этих целей используют Y, Sc и Mg. Однако использование только одного материал может вносить отрицательные эффекты. В частности, при толщине пленки порядка 100 nm в ней может развиться шероховатость, превосходящая 1 nm. В этой связи часто в качестве подслоя используют многослойные системы, такие как Y/Cr [14]. Слои хрома в данном случае служат стопором кристаллизации слоев Y из-за роста толщины. При этом делать слои и Y, и Cr нельзя ни слишком тонкими, ни слишком толстыми. Обычно толщина слоя Cr составляет ~ 2 nm — такого значения достаточно для предотвращения коррелированного роста шероховатости слоев Y. А слои Y составляют ~ 4 nm. При этом набор общей толщины подслоя осуществляется за счет увеличения количества периодов Y/Cr периодической структуры и обычно составляет 120–180 nm. Последующее удаление подслоя Y/Cr с осажденными поверх него отражающими МРЗ осуществляется в водном растворе соляной кислоты.

Однако за счет наличия строгой периодичности подслоя ($d \sim 6$ nm) и высокой интенсивности синхротронного излучения, на кривых спектральных зависимостей коэффициента отражения могут присутствовать паразитные пики отражения, соответствующие не основному отражающему покрытию, а лежащему под ним подслою. Эти пики будут вносить в монохроматический пучок искажения.

Нейтрализовать этот эффект мог бы подслой, не имеющий периодической структуры, а значит не обладающий ярко выраженными брэгговскими пиками отражения. В этой связи для настоящей работы был рассчитан и изготовлен апериодический подслой Y/Cr с плавно изменяющимися значениями толщин материалов от подложки к поверхности: от (Cr-2 nm и Y-6 nm) до (Cr-2 nm и Y-2 nm). Количество двойных слоев 26 штук. На рис. 6 приведен расчет спектральной зависимости коэффициента отражения от МРЗ Cr/Be с периодическим ($d = 6$ nm) и апериодическим подслоем Y/Cr в двух крайних рабочих значениях угла скольжения излучения — 0.5 и 0.95° при однократном отражении.

Как можно наблюдать, стандартный периодический подслой Y/Cr дает ярко выраженные дополнительные паразитные пики отражения в рабочем спектральном диапазоне (10–30 keV). В свою очередь, апериодический подслой ярко выраженных пиков не имеет, что дает возможность его использования. При этом как периодический, так и апериодический подслои оказывают одинаковое влияния на отражения от вышележащего МРЗ.

2.2. Осаждение отражающих покрытий на подложки

Все три отражающих МРЗ и апериодический подслой Y/Cr были осаждены на поверхность подложек для монохроматора. Как отмечалось выше, перед осаждением

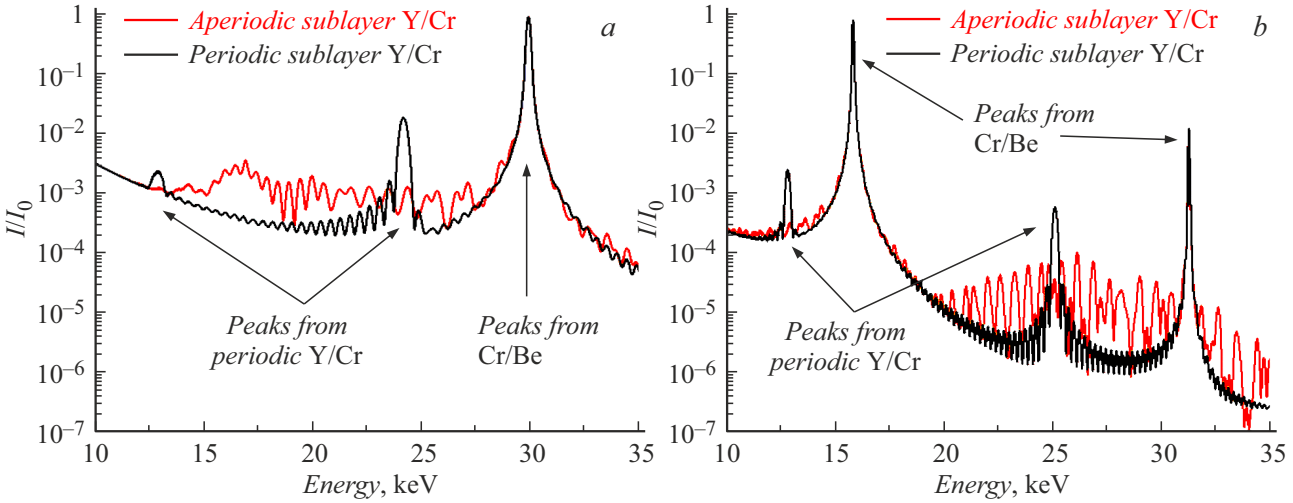

Рис. 6. Расчет спектрального отражения на углах 0.5° (*a*) и 0.95° (*b*) от МРЗ Cr/Be с периодическим подслоем Y/Cr и апериодическим подслоем Y/Cr.

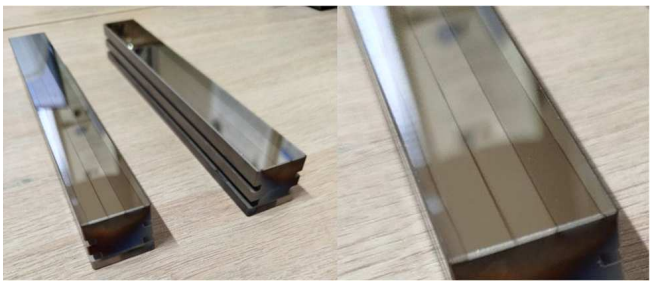

Рис. 7. Фотографии изготовленных подложек для монохроматора, с тремя отражающими МРЗ на поверхности. Слева — общая фотография двух подложек, справа — увеличенная.

на подложки была проведена процедура вывода равномерности на калибровочных пластинах. Максимальное отклонение периода от целевого на калибровочных пластинах:

— для МРЗ Cr/Be составляет 0.2 %, что удовлетворяет максимально допустимому отклонению;

— для МРЗ Mo/Be и МРЗ W/B_4C составляет 0.46 % и 0.42 % соответственно, что не превышает 0.5 %.

Таким образом, все три отражающих МРЗ обеспечивают необходимый уровень максимального возможного отклонения значения периода от целевого.

Фотография изготовленных подложек с отражающими МРЗ приведена на рис. 7.

Для проверки равномерности осаждения всех трех отражающих МРЗ подложки были измерены в 3 точках: центр подложки ($r = 0$) и в двух крайних точках на расстоянии ~ 15 mm от края ($r = +85$ и -85). На рис. 8 приведены кривые зеркального отражения в первом брегговском максимуме от трех МРЗ в разных координатах подложки (рис. 8, *a–c*) и кривые зеркального отражения в диапазоне углов 0–4° (рис. 8, *d*).

Положение первого брегговского максимума у МРЗ в разных координатах подложки, как и ожидалось, находится достаточно близко друг к другу — в пределах максимально допустимого отклонения. Отклонение положения Брегговских максимумов связано с неоднородностью напыления вдоль оси вращения. Структурные параметры, изготовленных МРЗ в центре подложки:

— МРЗ Cr/Be: $d = 2.36$ nm, $\beta = 0.4$, $N = 300$, s (на-Cr) $= s$ (на-Be) $= 0.46$ nm;

— МРЗ Mo/Be: $d = 3.95$ nm, $\beta = 0.38$, $N = 100$, s (на-Mo) $= 0.45$ nm, s (на-Be) $= 0.7$ nm;

— МРЗ W/B_4C: $d = 2.33$ nm, $\beta = 0.37$, $N = 180$, s(на-W) $= 0.3$ nm, s(на-B_4C) $= 0.4$ nm, где d — период МРЗ, β — отношение толщины более плотного материала к периоду, N — число периодов МРЗ, s — ширина переходной границы. Плотности слоев при определении параметров по данным малоугловой рентгеновской дифракции задавались табличными. Коэффициент отражения в первом брегговском максимуме для МРЗ на энергии 8 keV составляет: МРЗ Cr/Be $R = 39$ %, МРЗ Mo/Be $R = 71$ % и МРЗ W/B_4C $R = 67$ %. Также на картинах малоуглового рассеяния не наблюдается ярко выраженных пиков отражения от апериодического подслоя Y/Cr.

По измеренным данным были рассчитаны спектральные характеристики отражения всех трех МРЗ в своем поддиапазоне энергий (общий диапазон 10–30 keV) при рабочих значениях углов (0.5–0.95°) при двукратном отражении (рис. 9).

Все три МРЗ обеспечивают отражение в своем поддиапазоне энергий с перекрытием поддиапазонов в 2 keV (16–18 keV). Поддиапазон 16–30 keV обеспечивается двумя разными зеркалами Cr/Be и W/B_4C, которые имеют разное значение спектральной ширины отражения, оптимальной для разных исследовательских задач.

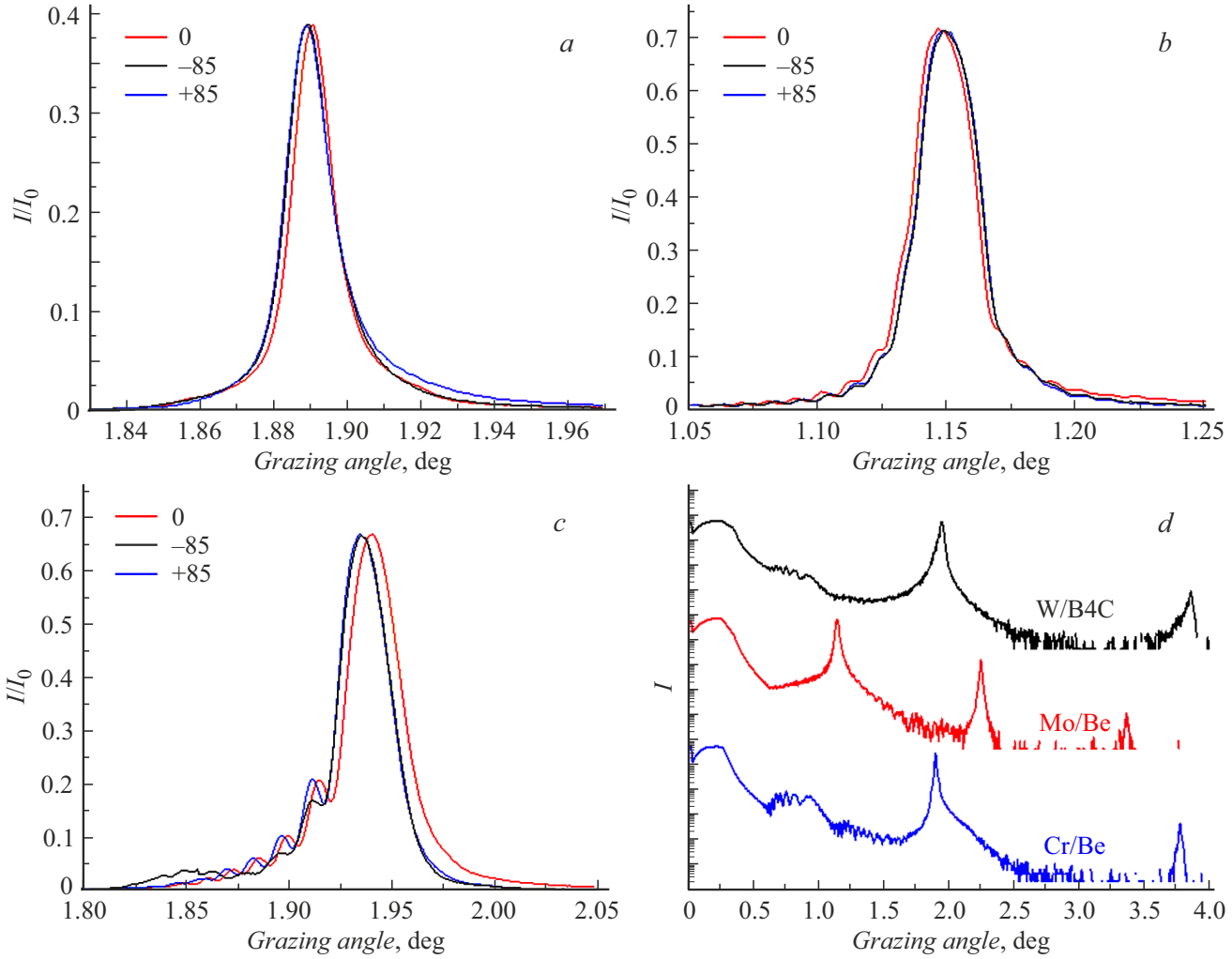

Рис. 8. Кривые зеркального отражения от трех МРЗ в разных координатах подложки: МРЗ Cr/Be (*a*), МРЗ Mo/Be (*b*), МРЗ W/B_4C (*c*) в первом брегговском максимуме и все три МРЗ в широком диапазоне углов скольжения (*d*).

Выводы

Изготовлены многослойные рентгеновские зеркала для двухзеркального монохроматора станции 1-1 „Микрофокус“ синхротрона СКИФ. Монохроматор обеспечивает монохроматизацию излучения в диапазоне энергий фотонов 10–30 keV при углах скольжения 0.5–0.95°. Каждое зеркало имеет три стриппа МРЗ, каждый из которых перекрывает свой поддиапазон.

В поддиапазоне 10–18 keV используется Mo/Be-многослойное зеркало с параметрами: $d = 3.95$ nm, $\beta = 0.38$, $N = 100$. Коэффициент отражения при двукратном отражении плавно увеличивается с 61.2 % до 82.1 %, а спектральная селективность падает с 1.65 % до 1.54 %.

В поддиапазоне 16–30 keV используются два МРЗ Cr/Be и W/B_4C, которые обладают разным уровнем спектральной селективности. Для получения большей спектральной селективности используется МРЗ Cr/Be с параметрами: $d = 2.36$ nm, $\beta = 0.4$, $N = 300$. Коэффициент отражения при двукратном отражении плавно увеличивается с 60.9 % до 84.9 %, а спектральная селективность падает с 0.565 % до 0.555 %. Для получения большей выходной мощности излучения используется МРЗ W/B_4C с параметрами: $d = 2.33$ nm, $\beta = 0.37$, $N = 180$. Коэффициент отражения при двукратном отражении плавно увеличивается с 40 % до 70.3 %, и спектральная селективность увеличивается с 1.65 % до 1.74 %.

Подробно описывается методика нанесения отражающих покрытий.

Финансирование работы

Разработка методики нанесения и напыление зеркал выполнена при поддержке гранта РНФ 21-72-30029-П. Измерение коэффициентов отражения и пересчет параметров в своих рабочих поддиапазонах были поддержаны грантом РНФ № 21-72-20108-П. При проведении исследований использовалось оборудование Центра кол-

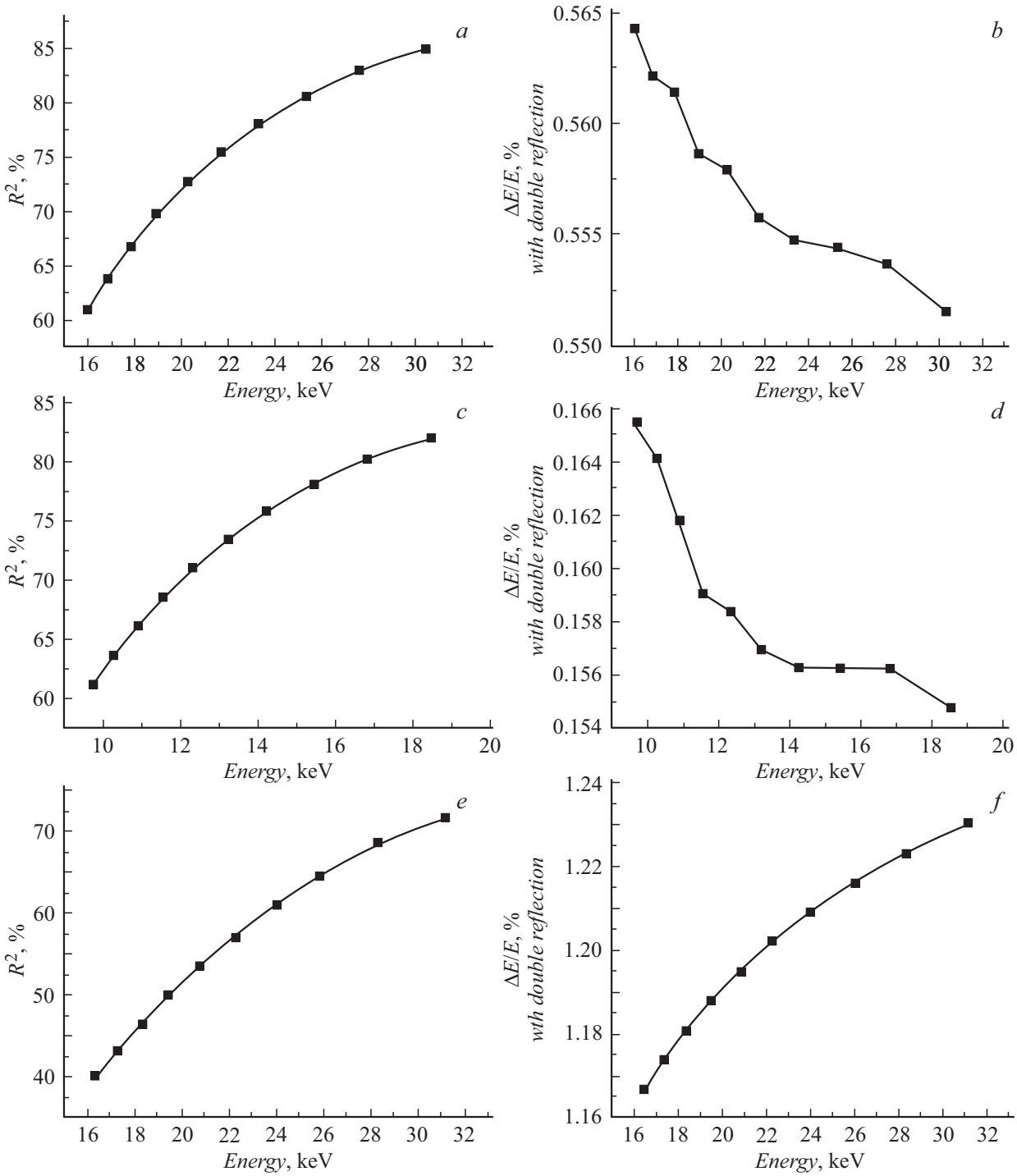

Рис. 9. Спектральные характеристики отражения всех трех МРЗ в своем поддиапазоне энергий (общий диапазон 10–30 keV) при рабочих значениях углов (0.5–0.95°) при двукратном отражении: МРЗ Cr/Be (*a*, *b*); МРЗ Mo/Be (*c*, *d*) и МРЗ W/B_4C (*e*, *f*).

лективного пользования „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Е.И. Глушков, А.А. Ахсахалян, П.А. Вепрев, И.Г. Забродин, М.В. Зорина, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Е.В. Петраков, Р.С. Плешков, Е.С. Антюшин, В.Н. Полковников, Д.Г. Реунов, А.Б. Уласевич, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников, Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, В.А. Чернов, И.П. Долбня. ЖТФ, **95** (10), 1963 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61350.125-25

[2] A. Erko, M. Idir, Th. Krist, A.G. Michette. *Modern Developments in X-ray and Neutron Optics* (Springer, NY., Berlin, Heidelberg, 2008)
[3] Н.И. Чхало, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов. УФН, **190** (1), 74 (2020).
[4] U. Dinger, F. Eisert, H. Lasser, M. Mayer, A. Seifert, G. Seitz, S. Stacklies, F. Stickel, M. Weiser. In: Soft X-Ray and EUV Imaging Systems. SPIE, **4146**, 35 (2000). DOI: 10.1117/12.406674
[5] A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov. Precision Engineer, **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
[6] S.R. Wilson, D.W. Reicher, J.R. McNeil. In: Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics, SPIE, **996**, 74 (1989). DOI: 10.1117/12.948051
[7] T.W. Drueding, S.C. Fawcett, S.R. Wilson, T.G. Bifano. Opt. Engineer., **34** (12), 3565 (1995). DOI: 10.1117/12.215648
[8] M. Xu, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou, W. Liao. Appl. Opt., **54** (27), 8055 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.008055
[9] M. Zeuner, S. Kiontke. Opt. Photonik, **7** (2), 56 (2012). DOI: 10.1002/opph.201290051
[10] T. Franz, T. Hänsel. In: *Optical fabrication and testing. OThC7, Optica Publishing Group* (2008), DOI: 10.1364/OFT.2008.OThC7
[11] Я.В. Зубавичус. *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов „СКИФ“. Т. 1. Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс* (Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 2022)
[12] Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, Е.И. Глушков, А.С. Гоголев, М.В. Горбачев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, И.П. Долбня, С.В. Ращенко, В.А. Чернов, Н.И. Чхало, М.Р. Шарафутдинов. Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, **336** (5), 229 (2025). DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122
[13] M. Svechnikov. Appl. Crystallography, **57** (3), 848 (2024).
[14] S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.V. Shestov, S.Y. Zuev. Appl. Optics, **55** (9), 2126 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.002126