

УДК 538.971

## КОМПЛЕКТ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ДВУХЗЕРКАЛЬНОГО МОНОХРОМАТОРА В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 0.41–15.5 нм

© 2019 г. А. А. Ахсахалян<sup>1</sup>, Ю. А. Вайнер<sup>1</sup>, С. А. Гарахин<sup>1</sup>, К. А. Елина<sup>2</sup>, П. С. Заверткин<sup>2</sup>,  
С. Ю. Зуев<sup>1</sup>, Д. В. Ивлюшкин<sup>2</sup>, А. Н. Нечай<sup>1</sup>, А. Д. Николенко<sup>2</sup>, Д. Е. Парьев<sup>1</sup>, Р. С. Плешков<sup>1</sup>,  
В. Н. Полковников<sup>1</sup>, Н. Н. Салашенко<sup>1</sup>, М. В. Свечников<sup>1</sup>, Н. И. Чхало<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, 607680 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\*E-mail: chkhalo@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 03.03.2018 г.

После доработки 12.03.2018 г.

Принята к публикации 12.03.2018 г.

Оптимизирован состав, рассчитаны рентгенооптические характеристики, изготовлен и изучен комплект многослойных зеркал для модернизированной версии двухзеркального монохроматора, установленного на синхротроне ВЭПП-5 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера. За счет использования семи поддиапазонов, для каждого из которых выбрана оптимальная пара материалов, комплект зеркал обеспечивает высокие, от 10 до 75%, коэффициенты отражения в широком диапазоне значений энергии фотонов 80–3000 эВ и длин волн 0.413–15.48 нм. Сообщается о принципах оптимизации пар материалов. Впервые изготовлены и изучены многослойные зеркала на основе пары материалов W/Be.

**Ключевые слова:** многослойное рентгеновское зеркало, синхротронное излучение, рентгеновская спектрометрия.

**DOI:** 10.1134/S0207352819010025

### ВВЕДЕНИЕ

Для значительной части экспериментов с использованием синхротронного излучения достаточно спектрального разрешения на уровне  $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$ , а на первый план выходят высокие пиковые и интегральные коэффициенты отражения. Также критически важной является минимизация влияния длинноволнового и коротковолнового излучений на результаты экспериментов на выбранной длине волны. В наибольшей степени этим условиям удовлетворяют многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) брэгговского типа. Большие рабочие углы, существенно превосходящие критические углы полного внешнего отражения, подавляют вклады как коротковолнового, так и длинноволнового излучений в результирующий монохроматический сигнал. Многослойные зеркала также могут эффективно подавлять высшие порядки дифракции. Четные порядки можно подавить практически до уровня нерезонансного отражения за счет выбора толщины сильно и слабо поглощающих материалов для периода  $d$  в соотношении 1 : 1. Отражение третьей и высших резонансных  $m$ -гармоник эф-

фективно подавляется за счет межслоевых шероховатостей  $\sigma$ , так как коэффициент отражения  $R_m \sim \exp(-4\pi^2(m\sigma/d)^2)$ . Двукратное отражение в составе двухзеркального монохроматора только усиливает фильтрующие свойства МРЗ, а также повышает результирующее спектральное разрешение примерно в 1.4 раза.

Дополнительным преимуществом использования МРЗ на практике являются относительно невысокие требования к конструкции спектрометра-монохроматора. Большие рабочие углы и широкая кривая качания существенно упрощают требования к точности механических узлов.

В 1998 г. в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был разработан спектрометр на основе двухзеркального монохроматора [1]. Спектрометр позволял исследовать спектры мягкого рентгеновского излучения в диапазоне значений энергии фотонов от 150 до 1800 эВ (0.7–8.2 нм) со спектральной селективностью  $\lambda/\Delta\lambda \sim 60$  в середине рабочего диапазона. В работе использовались МРЗ на основе Fe/C, изготовленные методом импульсного лазерного напыления [2], и на основе W/Si, изготовленные магне-

тронным распылением [3]. Подобные зеркала применяют в монохроматоре станции “Космос”, которая с 2007 г. по настоящее время функционирует на накопителе ВЭПП-4 в Институте ядерной физики СО РАН [4]. На монохроматор устанавливается одна из трех пар имеющихся многослойных зеркал, чтобы покрыть диапазон от 80 до 2000 эВ. Как показали измерения, правильный подбор рентгеновских фильтров позволяет добиваться достаточно высокой чистоты монохроматического излучения – менее 1% примеси фотонов за пределами текущей рабочей полосы монохроматора. Однако малое количество зеркал приводит к низкой светосиле прибора и, как следствие, к низким потокам фотонов в реальном эксперименте. Комплект зеркал, описываемый в настоящей работе, будет использован для модернизации этого монохроматора с целью получения более высоких потоков фотонов. Проведена модернизация механической части монохроматора для обеспечения установки новых зеркал. Современные задачи требуют: расширения рабочего диапазона, как в коротковолновую, так и длинноволновую области; увеличения спектральной селективности и коэффициентов отражения зеркал. С учетом значительного прогресса в технологии напыления многослойных зеркал в последние годы эти проблемы могут быть успешно решены за счет увеличения числа поддиапазонов и оптимизации выбора зеркал для каждого поддиапазона.

В настоящей работе оптимизируется состав МРЗ в соответствии с поддиапазонами, описываются методы изготовления и исследования отражательных и структурных свойств образцов, приводятся результаты исследования отражательных характеристик изготовленных образцов МРЗ.

## ТРЕБОВАНИЯ К ПОДЛОЖКАМ И МРЗ

При разработке комплекта зеркал для двухзеркального монохроматора помимо отмеченных выше требований повышения коэффициентов отражения и спектральной селективности учитывали специфические требования, связанные с конструкцией монохроматора: размер МРЗ  $5 \times 30 \times 40$  мм, диапазон рабочих углов (отсчитываются от плоскости зеркала)  $5^\circ$ – $85^\circ$ , рабочий диапазон энергии фотонов 80–3000 эВ. В длинах волн это соответствует диапазону 0.413–15.48 нм. Диапазон длин волн и рабочие углы задают максимальный диапазон периодов МРЗ. Минимальный период  $d = 2.2$  нм соответствует самому коротковолновому, а максимальный,  $d = 8.38$  нм – самому длинноволновому поддиапазону. С учетом дисперсии оптических констант материалов и гарантированного перекрытия рабочего диапазона длин волн диапазон периодов зеркал был выбран таким образом, чтобы в пределах углового сканирования монохроматора поддиапазоны пе-

рекрывались. Конкретные характеристики зеркал будут приведены ниже.

Для обеспечения максимальной эффективности отражения зеркала монохроматора, составляющие пару, должны быть идентичными. Спектральная селективность и допустимые отклонения периода  $\Delta d$  МРЗ от номинального значения  $d_{\text{ном}}$  связаны соотношением:

$$\lambda/\Delta\lambda = d_{\text{ном}}/\Delta d. \quad (1)$$

С учетом перемножения кривых отражения на выходе монохроматора результирующая спектральная ширина зондового пучка меньше примерно в 1.4 раза по сравнению с однократным отражением. Поэтому для обеспечения максимальной эффективности относительное отклонение периода от номинального значения должно быть  $\Delta d/d_{\text{ном}} < 0.007$ . Так как из одной пластины диаметром 100 мм вырезали два зеркала, то равномерность периода по всем пластинам выводили с точностью лучше 0.4%.

Рассмотрим, как параметры зеркал влияют на требования к поверхности подложек. Основными характеристиками поверхности подложки, влияющими на коэффициенты отражения и форму отраженного волнового фронта, оказываются микрошероховатость и отклонения формы поверхности от заданной. В данном случае – от плоскости. Локальные ошибки формы поверхности приводят к отклонению локального угла падения от брэгговского. Таким образом, требование к плоскостности подложек можно сформулировать следующим образом. Локальные ошибки  $\Delta\theta_{\text{ерт}}$  должны удовлетворять условию:

$$\Delta\theta_{\text{ерт}} \ll \Delta\theta_{\text{бр}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\theta_{\text{бр}}$  – ширина брэгговского пика на полувысоте коэффициента отражения. Для оценки можно принять, что наименьшая угловая ширина будет при минимальном угле падения  $5^\circ$  для МРЗ последнего поддиапазона. С учетом спектральной селективности  $\lambda/\Delta\lambda \approx 100$  полуширина пика составит  $\Delta\theta_{\text{бр}} = 8.7 \times 10^{-4}$  рад. Для минимизации стоимости подложек в настоящей работе использовали общедоступные тонкие кремниевые пластины, приклеенные с применением технологии оптического контакта к массивной подложке из нержавеющей стали. Эта технология гарантирует угловые ошибки на уровне  $\Delta\theta_{\text{ерт}} < (1-2) \times 10^{-4}$  рад [5].

Известно, что сильнее всего на величину коэффициента отражения МРЗ влияет микрошероховатость поверхности. В значительном числе работ отмечается, что достаточной для большого числа применений является величина на уровне 0.1–0.2 нм. В работе использовали кремниевые подложки для микроэлектронной промышленности, подвергнутые химико-механической полировке на финальной стадии изготовления.

**Таблица 1.** Поддиапазоны и основные параметры многослойных зеркал, изготовленных для двухзеркального монохроматора

№ поддиапазона	Интервал значений энергии, эВ	Интервал длин волн, нм	Структура МРЗ	Число периодов МРЗ	Период $d$ , нм
1	80–111	11.17–15.5	Mo/Be	90	8.38
2	111–133	9.32–11.17	Mo/Y	60	6.34
3	133–183	6.68–9.32	Mo/B <sub>4</sub> C	150	5.06
4	183–277	4.47–6.68	Cr/C	100	3.55
5	277–395	3.14–4.47	Cr/Sc	150	2.48
6	395–1840	0.67–3.14	W/Be	200	2.28
7	1840–3000	0.41–0.67	Cr/C	200	2.22

Микрошероховатость измеряли с помощью атомно-силового микроскопа на специальном стенде [6]. Микрошероховатость пластин по кадру  $2 \times 2$  мкм составляла около 0.1 нм.

### ВЫБОР ПОДДИАПАЗОНОВ И МАТЕРИАЛОВ МРЗ

Современный подход к выбору пар материалов МРЗ, обеспечивающих одновременно максимальные пиковые значения коэффициентов отражения и высокую спектральную селективность в заданном спектральном диапазоне заключается в использовании материалов как сильно, так и слабо поглощающих, у которых скачки поглощения находятся максимально близко к коротковолновой части рабочего диапазона (например, [7, 8]). В интересующем диапазоне длин волн  $\lambda > 12.4$  нм широко используются МРЗ на основе Mo/Si [9]. Полученные к настоящему времени коэффициенты отражения составляют 71% при  $\lambda = 12.7$  нм и 70.15% при  $\lambda = 13.5$  нм [10]. В диапазоне длин волн  $\lambda = 11.1–12.4$  нм наивысшие экспериментально полученные коэффициенты отражения достигают 70% для структуры типа Mo/Be [11]. В диапазоне длин волн  $\lambda = 9.3–11.1$  нм используют МРЗ на основе Mo/Y [12, 13], Ru/Y [8, 14], и Pd/Y [14, 15]. В области длин волн за  $K$ -краем поглощения бора ( $\lambda = 6.6–9.3$  нм) применяются МРЗ типа Mo/B<sub>4</sub>C, La/B<sub>4</sub>C и La/V [16–18].

В диапазоне длин волн  $\lambda = 4.4–6.6$  нм наилучшие рентгенооптические характеристики имеют МРЗ Cr/C, Co/C и Ni/C [19–21]. В диапазоне  $\lambda = 3.1–4.4$  нм – Cr/Sc [22]. Наиболее проблемной является область длин волн  $\lambda = 2.3–3.1$  нм. В этом диапазоне традиционно слабо поглощающие материалы бор, углерод и кремний достаточно сильно поглощают, поэтому МРЗ на их основе имеют низкие (менее 10%) коэффициенты отражения. Высоких коэффициентов отражения можно достичь только в областях аномалий дисперсии оптических констант Ti ( $\lambda = 2.74$  нм) (МРЗ Cr/Ti

[23]) и V ( $\lambda = 2.4$  нм) (МРЗ Cr/V [24]). Так как диапазон очень узкий, фактически наблюдаются только фиксированные линии, и для применения в широкополосном спектрометре-монохроматоре эти зеркала применяться не могут.

В области длин волн 0.683–2.3 нм, до  $M_V$ -края поглощения W ( $\lambda_M = 0.683$  нм), широко используются зеркала W/Si и W/B<sub>4</sub>C [25, 26]. В коротковолновой части спектрального диапазона спектрометра-монохроматора 0.413–0.683 нм применяются зеркала с самыми короткими периодами. Следует отметить, что из-за скачков поглощения в этом диапазоне не могут применяться W-, Mo- и Si-содержащие зеркала. В этой связи наиболее перспективными выглядят короткопериодные МРЗ Cr/C [27].

На основе проведенного анализа и с целью увеличения коэффициентов отражения зеркал, большей унификации и уменьшения числа поддиапазонов в настоящей работе были использованы новые подходы. Во-первых, вместо традиционных МРЗ Mo/Si в первом поддиапазоне (табл. 1) были использованы МРЗ Mo/Be, которые, как было показано в [28, 29], обладают рекордными коэффициентами отражения не только в области 11, но и 13 нм. Также это позволило расширить первый поддиапазон (от 12.4 до 11.1 нм) в область коротких длин волн, что позитивно сказалось на коэффициентах отражения во втором поддиапазоне, так как не потребовалось уходить далеко от области длин волн, соответствующей аномальной дисперсии оптических констант иттрия.

Во-вторых, для проблемной области  $\lambda = 2.3–3.1$  нм впервые было применено МРЗ на основе W/Be. Благодаря удаленности от  $K$ -края поглощения Be ( $\lambda_K = 11.1$  нм) и низкой плотности поглощения этого материала существенно меньше, чем у C, B<sub>4</sub>C и Si, что делает его наиболее перспективным из слабо поглощающих материалов. Также впервые для диапазона длин волн 0.683–2.3 нм были изготовлены и изучены МРЗ на основе W/Be.

### СИНТЕЗ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МРЗ

Многослойные зеркала параллельно изготавливали на нескольких установках магнетронного распыления. Для нанесения покрытий использовали метод магнетронного распыления на постоянном токе. Подробнее параметры технологического процесса и особенности распыления  $\text{W}$  описаны в [30]. Угловые зависимости коэффициентов отражения при  $\lambda = 0.154$  нм измеряли с помощью дифрактометра PANalytical Expert'Pro с четырехкристалльным асимметричным монохроматором  $\text{Ge}(220)$ . Монохроматор обеспечивает угловую расходимость зондового пучка на уровне  $0.0036^\circ$ . Такое высокое разрешение позволяет надежно измерять коэффициенты отражения для высоких брэгговских порядков.

Коэффициенты отражения в мягком рентгеновском диапазоне измеряли с помощью двух лабораторных рефлектометров на основе спектрометров-монохроматоров РСМ-500. В качестве источников рентгеновского излучения применяли разборные рентгеновские трубки. В диапазоне длин волн 0.7–5 нм использовали дифракционную решетку с радиусом кривизны 6000 мм, в диапазоне 4.4–17 нм – с радиусом кривизны 2000 мм. Спектральное разрешение в первом диапазоне составляло 0.012 нм, во втором – 0.04 нм. Измерения проводили на характеристических линиях анодов рентгеновских трубок. Подробное описание рефлектометров можно найти в [31].

Следует заметить, что в коротковолновом диапазоне спектральная ширина  $\Delta\lambda_{\text{лин}}$  ряда линий, таких как  $\text{Fe}L_\alpha$ ,  $\text{Cu}L_\alpha$ ,  $\text{Mg}K_\alpha$  и  $\text{Al}K_\alpha$ , существенно меньше разрешения, обеспечиваемого решеточным спектрометром-монохроматором  $\Delta\lambda_{\text{пр}}$ . Таким образом, несмотря на относительно невысокое спектральное разрешение прибора (например, при  $\lambda = 1$  нм  $\lambda/\Delta\lambda_{\text{пр}} \approx 83.3$ ), реальная спектральная селективность составляет  $\lambda/\Delta\lambda_{\text{лин}} \approx 1000$ . Это позволяет проводить прецизионные измерения как коэффициентов отражения, так и спектральной селективности многослойных зеркал.

Для восстановления структурных параметров МРЗ по данным рентгеновского отражения была использована так называемая “расширенная” модель [32]. Основное отличие данной модели от существующих – это то, что в процессе подгонки экспериментальных кривых переходные области представляют в виде линейной комбинации наиболее часто употребляемых функций. Такая модель в наилучшей степени удовлетворяет разнообразию физических процессов на границах в многослойных тонкопленочных структурах. В частности, межслоевые шероховатости наилучшим образом описываются функцией ошибок [33], в

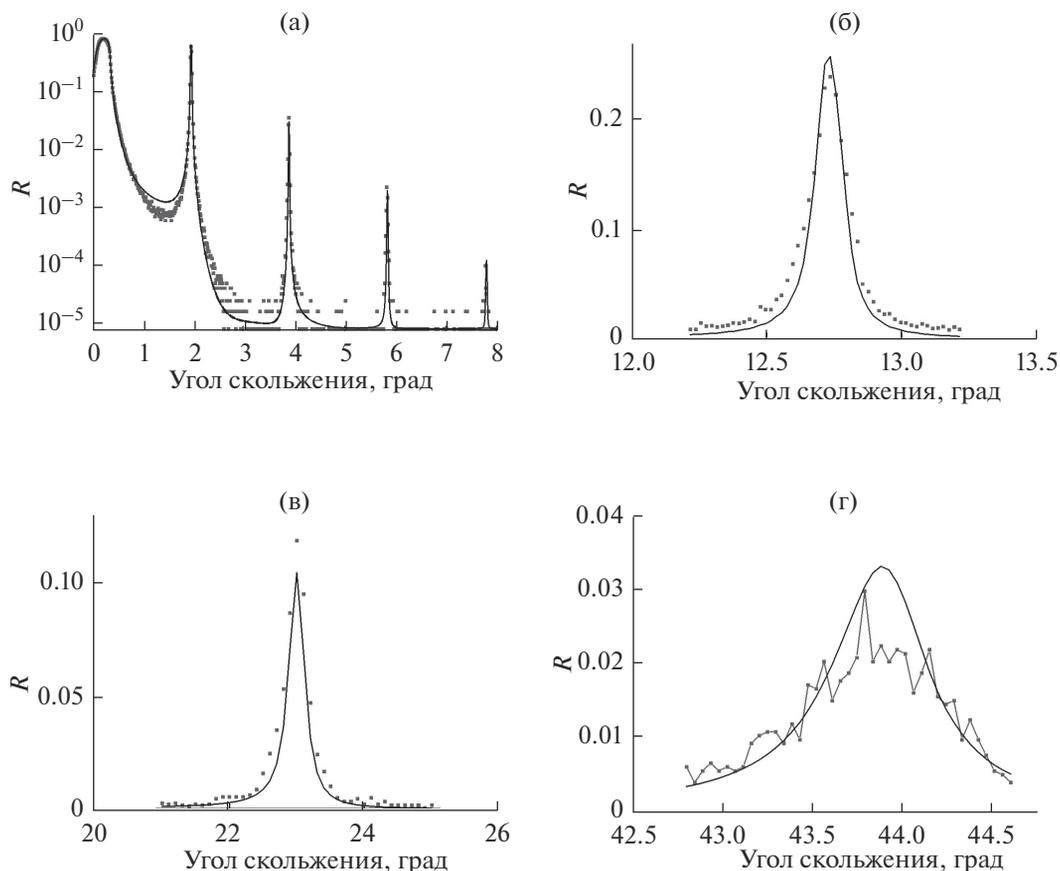
то время как диффузия – линейной функцией (например, [34, 35]). Очень интересным оказалось введение в эту комбинацию ступенчатой функции. При описании границ она позволяет обнаружить стехиометрические слои в переходной области [32]. Наилучший фитинг достигается при использовании нескольких кривых отражения, измеренных на различных длинах волн.

Проиллюстрируем пример применения описанной модели для изучения структурных параметров многослойного зеркала на основе  $\text{W}/\text{W}$ . Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения для длин волн 0.154, 0.989, 1.759 и 3.14 нм приведены на рис. 1. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия на рис. 1г – измеренные значения. Как видно из рисунка, экспериментальные кривые, за исключением длины волны 3.14 нм, соответствуют расчетным при следующих структурных параметрах МРЗ: количество периодов  $N = 200$ ; период  $d = 2.278$  нм, средние по структуре толщины слоев вольфрама  $d(\text{W}) = 0.951$  нм и бериллия  $d(\text{Be}) = 1.327$  нм, плотность  $\text{W}$  18 г/см<sup>3</sup>, плотность  $\text{Be}$  – табличная; толщины переходных слоев  $\text{Be}$ -на- $\text{W}$  0.4 нм и  $\text{W}$ -на- $\text{Be}$  0.21 нм. Следует отметить, что последовательность границ с использованием метода рефлектометрии однозначно не определяется, соответственно, наилучшей границей может быть и  $\text{Be}$ -на- $\text{W}$ . Как правило, эта проблема решается применением дополнительного метода электронной микроскопии поперечных срезов. Неудовлетворительное совпадение на длине волны 3.14 нм объясняется низкими интенсивностями зондового пучка и значениями коэффициента отражения МРЗ. Ситуация усугубилась вследствие близости угла падения к углу Брюстера, что автоматически уменьшило в два раза коэффициент отражения неполяризованного излучения.

### ИЗУЧЕНИЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКТА ЗЕРКАЛ

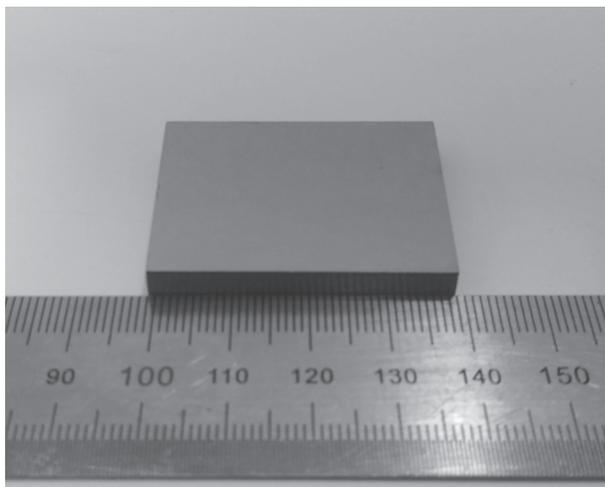
Внешний вид одного зеркала приведен на рис. 2. В наборе было изготовлено 14 зеркал с идентичными геометрическими размерами. Выбранные поддиапазоны и основные параметры многослойных зеркал, изготовленных для двухкристалльного монохроматора, приведены в табл. 1.

Спектральные зависимости пикового коэффициента отражения, интегрального коэффициента отражения в рабочем поддиапазоне длин волн и спектральной селективности для  $s$ -поляризованного излучения (двухкристалльный монохроматор на синхротроне работает в такой конфигурации) одиночных зеркал приведены на рис. 3. Кривые рассчитаны с использованием структурных параметров каждого МРЗ, полученных по описанной выше методике. В каждом случае под-



**Рис. 1.** Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения МРЗ на основе W/Be для длин волн: а – 0.154; б – 0.989; в – 1.759; г – 3.14 нм. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия – эксперимент.

гонка велась по четырем экспериментальным кривым отражения. Из рисунка видно, что максимальные коэффициенты отражения, до 75%,

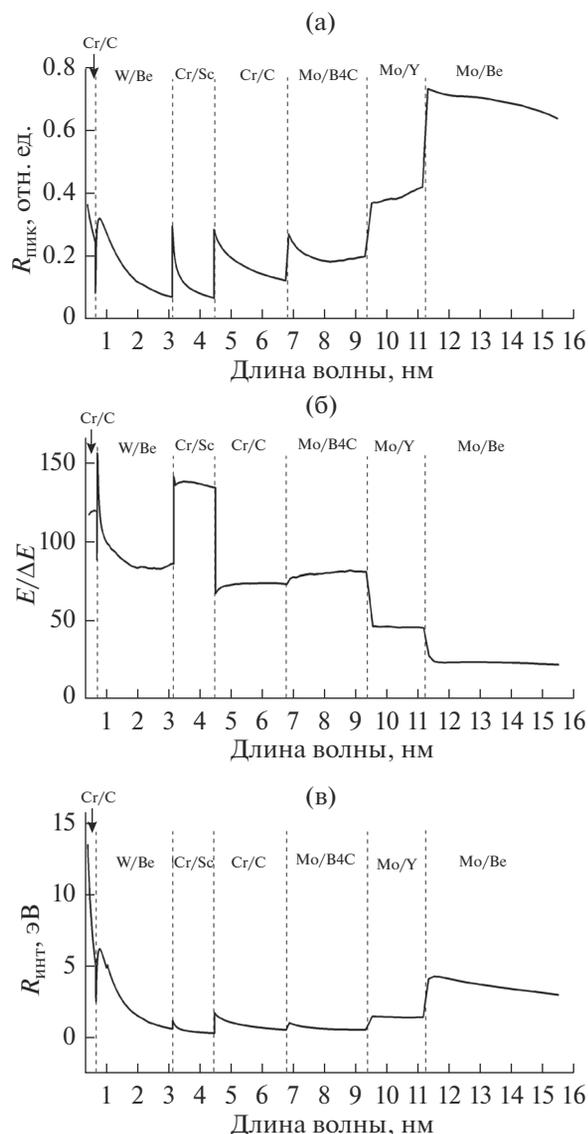


**Рис. 2.** Фотография одиночного зеркала из комплекта зеркал для двухкристального монохроматора.

обеспечивают МРЗ Mo/Be в окрестности 11 нм. По мере движения в коротковолновую область коэффициенты отражения осциллируют в диапазоне 10–40%. Только в очень узких областях около 3 и 4 нм коэффициент отражения падает ниже 10%. Спектральная селективность одиночного зеркала изменяется в пределах  $\lambda/\Delta\lambda \approx 25-150$ . Соответственно, в составе двухзеркального монохроматора достигается максимальная спектральная селективность на уровне  $\lambda/\Delta\lambda \approx 210$ . Например, в диапазоне значений энергии фотонов 277–395 эВ энергетическая ширина зондового пучка составляет около 1.5 эВ, что, с учетом отсутствия заметной дисперсии  $C_1$  и  $C_2$ , позволяет использовать этот прибор для спектроскопических исследований органических материалов.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработан, изготовлен и охарактеризован комплект многослойных зеркал для двухзеркального рентгеновского монохроматора, предназначенного для работы на синхротроне. По сравнению с



**Рис. 3.** Спектральные зависимости для  $s$ -поляризованного излучения МРЗ для двухзеркального монохроматора: а – пикового коэффициента отражения; б – спектральной селективности; в – интегрального коэффициента отражения.

предыдущей версией разработанных зеркал был расширен рабочий спектральный диапазон, увеличены коэффициенты отражения и спектральная селективность прибора. Максимальный коэффициент отражения для  $s$ -поляризованного излучения составил 75% в окрестности 11 нм. По мере движения в коротковолновую область коэффициенты отражения осциллировали в диапазоне 10–40%. Только в очень узких областях около 3 и 4 нм коэффициент отражения падал ниже 10%. Спектральная селективность одиночного зеркала изменялась в пределах  $\lambda/\Delta\lambda \approx 25$ –150. Соответственно, в составе двухзеркального моно-

хроматора максимальная спектральная селективность  $\lambda/\Delta\lambda \approx 210$ .

Очень интересным результатом является достигнутое в двухзеркальной схеме относительно высокое энергетическое разрешение в диапазоне значений энергии фотонов 277–395 эВ. Энергетическая ширина зондового пучка составляет около 1.5 эВ, что сравнимо с разрешением решеточных спектрометров-монокроматоров типа РСМ-500 или McPherson-247 в этом диапазоне. Известно, что из-за артефактов, вызванных загрязнением углеводородами поверхности дифракционных решеток и зеркал решеточного монохроматора, очень сложно проводить спектроскопические измерения в области  $K$ -края углерода. Благодаря нормальному падению излучения, а также отсутствию заметной дисперсии оптических констант  $Cr$  и  $Sc$  в этой области спектроскопические исследования органических материалов с использованием двухзеркального монохроматора существенно упрощаются.

Впервые для широкой спектральной области 0.67–3.14 нм были применены МРЗ на основе W/Be. В работе изучены их внутреннее строение и рентгенооптические характеристики. Показано, что образцы с периодом вплоть до 2 нм обеспечивают хорошие отражательные свойства. Обнаружено, что элементарная ячейка у этого типа МРЗ не симметричная. Наилучший фитинг достигается при следующих параметрах переходных областей: 0.4 нм для Be-на-W и 0.21 нм для W-на-Be. Следует отметить, что рефлектометрия однозначно не определяет последовательность границ, поэтому наилучшей границей может быть Be-на-W. Как правило, эта проблема решается с использованием электронной микроскопии поперечных срезов. Наличие одной “хорошей” границы позволяет надеяться на существенное увеличение коэффициента отражения МРЗ W/Be за счет формирования прослойки на этой границе. Эти исследования планируются в ближайшее время.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа по модернизации монохроматора станции “Космос”, также по изготовлению большей части зеркал выполнена с использованием оборудования ЦКП “СЦСТИ” на базе ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН при поддержке Минобрнауки РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI-62117X0012). В части нанесения покрытий W/Be работы были выполнены с использованием оборудования ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” ИФМ РАН при поддержке РФФИ (грант № 16-42-01034), РФФИ (гранты № 17-52-150006, № 18-02-00588, № 18-07-00633 и № 18-02-00173), а также в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0204), Программ РАН I.1 “Физика конденсированных

сред и материалы нового поколения” и I.2 “Нано-структуры: физика, химия, биология, основы технологий”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов Н.Г., Легкодымов А.А., Николенко А.Д. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2000. № 1. С. 129.
2. Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kovalenko N.V. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 121.
3. Кругляков Э.П., Николенко А.Д., Семенов Е.П. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1999. № 1. С. 151.
4. Николенко А.Д., Авакян С.А., Афанасьев И.М. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 5. С. 13.
5. Ахсахалян А.Д., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 1. С. 5. doi 10.7868/S0207352817010048
6. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4905336>.
7. Montcalm C., Kearney P.A., Slaughter J.M. et al. // Appl. Opt. 1996. V. 35. № 25. P. 5134.
8. Барышева М.М., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 7. С. 727.
9. Bajt S., Alameda J., Barbee T. et al. // Opt. Engin. 2002. V. 41. № 8. P. 1797.
10. Yakshin A.E., van de Kruijs R.W.E., Nedelcu I. et al. // Proceed. SPIE. 2007. V. 6517. P. 65170I.
11. Montcalm C., Bajt S., Mirkarimi P.B. et al. // Proceed. SPIE. 1998. V. 3331. P. 42.
12. Sae-Lao B., Bajt S., Montcalm C., Seely J.F. // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 13. P. 2394.
13. Windt D.L., Donguy S., Seely J. et al. // Proceed. SPIE. 2004. V. 5168. P. 1.
14. Windt D.L., Gullikson E.M. // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 18. P. 5850.
15. Xu D., Huang Q., Wang Y. et al. // Opt. Express. 2015. V. 23. № 26. P. 33018.
16. Jankowski A.F., Perry P.L. // Thin Solid Films. 1991. V. 206. P. 365.
17. Chkhalo N.I., Kunstner S., Polkovnikov V.N. et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 011602.
18. Kuznetsov D.S., Yakshin A.E., Sturm J.M. et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40. № 16. P. 3778.
19. Андреев А.В., Пономарев Ю.В., Прудников И.П., Салащенко Н.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1999. № 1. С. 50.
20. Wen M., Huang Q., Ma S. et al. // Opt. Express. 2016. V. 24. № 24. P. 27166.
21. Chernov V.A., Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V. et al. // J. X-Ray Science and Technol. 1995. V. 5. P. 389.
22. Salashchenko N.N., Shatov E.A. // Opt. Commun. 1997. V. 134. P. 7.
23. Ghafoor N., Persson P.O., Birch J. et al. // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 1. P. 137.
24. Huang Q., Fei J., Liu Y. et al. // Opt. Lett. 2016. V. 41. № 4. P. 701.
25. Windt D.L., Christensen F.E., Craig W.W. et al. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 1. P. 460.
26. Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Fraerman A.A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2005. V. 543. P. 333.
27. Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I. et al. // J. Synchr. Rad. 2003. V. 10. P. 358.
28. Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 9. P. 2126.
29. Chkhalo N., Gusev S., Nechay A. et al. // Opt. Lett. 2017. V. 42. Iss. 24. P. 5070.
30. Chkhalo N.I., Pariev D.E., Polkovnikov V.N. et al. // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 106.
31. Bibishkin M.S., Chekhonadskikh D.P., Chkhalo N.I. et al. // Proceed. SPIE. 2004. V. 5401. P. 8.
32. Svechnikov M., Pariev D., Nechay A. et al. // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. P. 1428.
33. Nénot L., Croce P. // Rev. Phys. Appl. 1980. V. 15. P. 761.
34. Андреев С.С., Барышева М.М., Чхало Н.И. и др. // Журн. тех. физики. 2010. Т. 80. № 8. С. 93.
35. Makhotkin I. A., Zoethout E., van de Kruijs R. et al. // Opt. Express. 2013. V. 21. P. 29894.

## Set of Multilayer X-Ray Mirrors for a Double-Mirror Monochromator for a Wavelength Range of 0.41–15.5 nm

A. A. Aksakhalyan, Yu. A. Vainer, S. A. Garakhin, K. A. Elina, P. S. Zaverkin, S. Yu. Zuev, D. V. Ivlyushkin, A. N. Nechay, A. D. Nikolenko, D. E. Pariev, R. S. Pleshkov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov, N. I. Chkhalo

A set of multilayer X-ray mirrors with optimized composition for a double-mirror monochromator installed on the VEPP-5 synchrotron of Budker Institute of Nuclear Physics has been fabricated and its X-ray optical characteristics have been studied. Due to use of seven subbands (an optimal pair of materials is chosen for each subband), the mirror set provides high, from 10 to 75%, reflection coefficients in a wide range of photon energies 80–3000 eV or wavelengths 0.413–15.48 nm. Principles of optimization of material compositions are reported. Multilayer mirrors based on pair of W/Be materials have been made and studied for the first time.

**Keywords:** multilayer X-ray mirror, synchrotron radiation, X-ray spectrometry.