

Дисперсионные элементы зеркального спектрометра на диапазон 7–30 nm

© С.А. Гарахин, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2023 г.
В окончательной редакции 28 марта 2023 г.
Принято к публикации 28 марта 2023 г.

Рассчитаны и синтезированы многослойные интерференционные структуры, выступающие в качестве дисперсионных элементов для зеркального спектрометра на диапазон длин волн 7–30 nm. Реализованы три элемента: на диапазон $\lambda = 7\text{--}12\text{ nm}$ — многослойная структура Mo/B4C (число периодов $N = 60$; толщина периода $d = 6.5\text{ nm}$); на диапазон $\lambda = 11\text{--}18\text{ nm}$ — структура Mo/Be ($N = 50$; $d = 9.83\text{ nm}$); на диапазон $\lambda = 17\text{--}30\text{ nm}$ — структура Be/Si/Al ($N = 40$; $d = 18.2\text{ nm}$). Для всего спектрального диапазона была получена эффективность более 10% при разрешении по длине волны 0.15–1.0 nm.

Ключевые слова: мягкое рентгеновское и экстремальное ультрафиолетовое излучения, многослойные рентгеновские зеркала, лазерная плазма, спектроскопия.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55760.60-23

Введение

Простейшей схемой источника синхротронного излучения, основанного на принципах лазерного ускорения электронов, является так называемое „бетатронное излучение“. Лазерно-плазменное бетатронное излучение возникает в процессе ускорения электронов в кильватерной волне, создаваемой в плазме фемтосекундным лазерным импульсом. На ускоряемые электроны в кильватерной волне действует поперечная сила, приводящая к колебаниям электронов около оси кильватерной волны. Для исследования физики взаимодействия лазерного излучения с веществом, получения и систематизации данных о спектральном составе, эмиссионной эффективности, степени монохроматичности и пространственной когерентности рентгеновского источника в зависимости от параметров лазерного импульса и типа лазерной мишени необходима аттестация излучения в широком диапазоне длин волн. Важное значение помимо спектра излучения имеют сведения об его абсолютной интенсивности. Для решения данных задач был разработан спектрометр [1] на базе многослойных рентгеновских зеркал и абсолютно калиброванного детектора мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения — кремниевого фотодиода SPD-100UV [2]. В качестве рабочего был выбран диапазон длин волн (7–30 nm), в котором имеются экспериментально подтвержденные результаты по синтезу высокоотражающих многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ).

1. Расчет рентгенооптических элементов

Спецификой задачи является не только получение высоких коэффициентов отражения, но и хорошего спектрального разрешения. Таким образом, для эффективной регистрации спектра излучения бетатронного источника необходимо чтобы элемент, раскладывающий излучение в спектр, обладал высокими спектральным разрешением (отношением $\lambda/\delta\lambda$) и коэффициентом отражения. В данном спектрометре была поставлена задача добиться спектрального разрешения лучше 1 nm во всем обозначенном выше диапазоне длин волн. Был проведен расчет и оптимизация многослойных зеркал, которые могли бы быть использованы в качестве диспергирующего элемента в спектральном диапазоне 7–30 nm. Для этих целей проанализирован ряд материалов, имеющих низкое поглощение в обозначенном выше диапазоне длин волн. Показатель преломления в рентгеновском диапазоне длин волн близок к единице, но меньше ее. Таким образом, общий вид показателя преломления (n) удобно записывать в виде (2).

$$n = 1 - \delta + i\gamma, \quad (1)$$

где δ — действительная часть поправки показателя преломления, γ — мнимая. На рис. 1 представлены кривые действительной и мнимой частей поправки показателя преломления наиболее перспективных в данном диапазоне длин волн материалов.

Наиболее перспективной парой материалов для синтеза многослойной интерференционной структуры, как

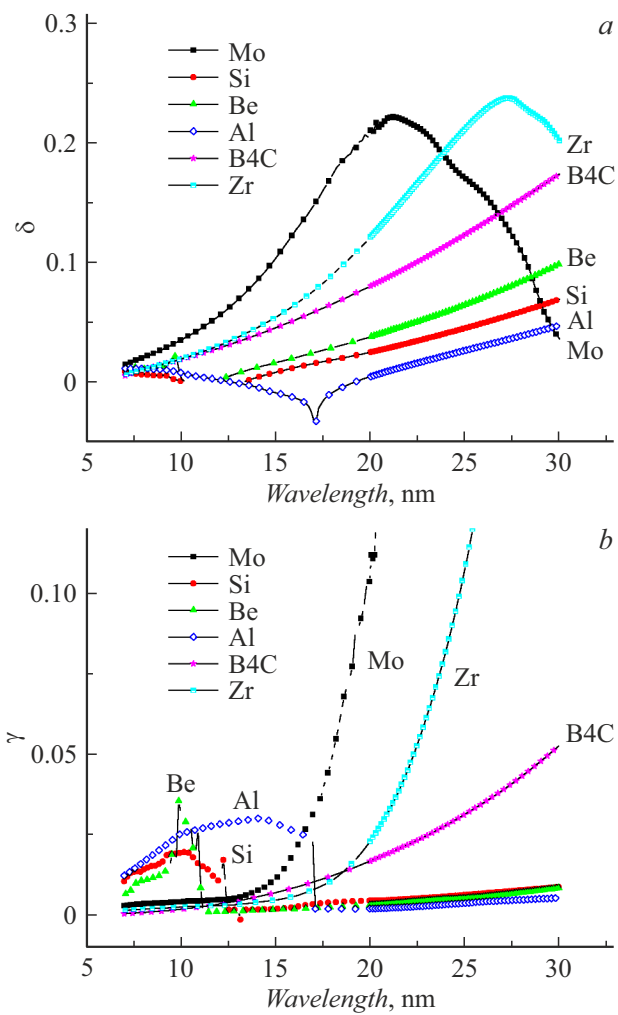


Рис. 1. Действительная (a) и мнимая (b) части показателя преломления ряда материалов [3].

правило, являются материалы с наибольшим скачком действительной части показателя преломления, так называемый „абсорбер“ (тяжелый материал) и „спейсер“ (легкий материал). Как можно видеть (рис. 1, a), наибольшее значение — во всем обозначенном выше диапазоне длин волн обладает Mo, однако при длинах волн более 15 nm у него наблюдается катастрофический рост поглощения (рис. 1, b), что делает его применение в качестве основы многослойной структуры в диапазоне длин волн более 17 nm неперспективным. В то же время Al в окрестности длины волны 17 nm, наоборот, имеет край поглощения, и значение его мнимой части показателя преломления скачком уменьшается более чем на порядок и становится меньше, чем у остальных представленных на рис. 1 кандидатов. Таким образом, именно эти два материала имеют явный приоритет для применения в качестве составляющих многослойной структуры в данном диапазоне длин волн. С помощью программы Multifitting [4] были промоделированы различные сочетания отражающих материалов со спейсе-

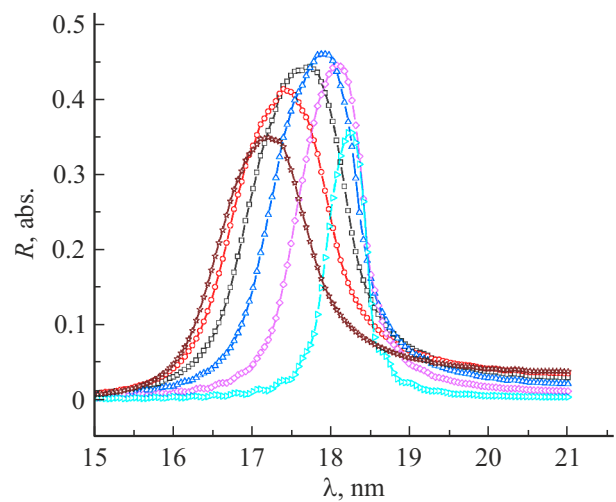


Рис. 2. Расчетные кривые спектральной зависимости отражения рентгеновского излучения от зеркала Mo/Be ($d = 10$ nm, число периодов $N = 50$, $\varphi = 72.3^\circ$).

рами. Моделировалось число периодов в структуре, соотношение толщин материалов в периоде, учитывались реальная шероховатость подложки и др. Влияние доли абсорбера в периоде на отражательные и спектральные характеристики зеркала представлены на рис. 2 и в табл. 1. Расчет произведен для угла скольжения $\varphi = 72.3^\circ$ (здесь и далее все углы отсчитываются от поверхности).

Как можно видеть, соотношение материалов ($\beta = d_{ab}/d$, где d_{ab} — толщина слоя абсорбера в периоде, d — толщина периода структуры) в структуре оказывает значительное влияние на величину пикового коэффициента отражения и спектральную ширину ($\delta\lambda$) брэгговского максимума. Таким образом, для расчета МРЗ спектрометра была проведена оптимизация параметров структуры. Перекрыть обозначенный выше спектральный диапазон с необходимым спектральным разрешением удалось за счет трех зеркальных элементов, структура и параметры которых приведены в табл. 2, где β — доля сильнопоглощающего материала (абсорбера) в периоде, N — число периодов, $\Delta\lambda$ — диапазон длин волн, $\Delta\varphi$ — соответствующий диапазон углов поворота зеркала, $\delta\lambda$ — ширина брэгговского максимума на полувысоте.

Кривые зеркального отражения неполяризованного излучения для смоделированных структур на различных длинах волн и соответствующих им углах падения/отражения, находящихся в доступном для сканирования механикой спектрометра диапазоне, представлены на рис. 3.

Как можно видеть, предложенные пары материалов позволяют ожидать высоких (более 10%) коэффициентов отражения с требуемым спектральным разрешением во всем рабочем диапазоне длин волн спектрометра.

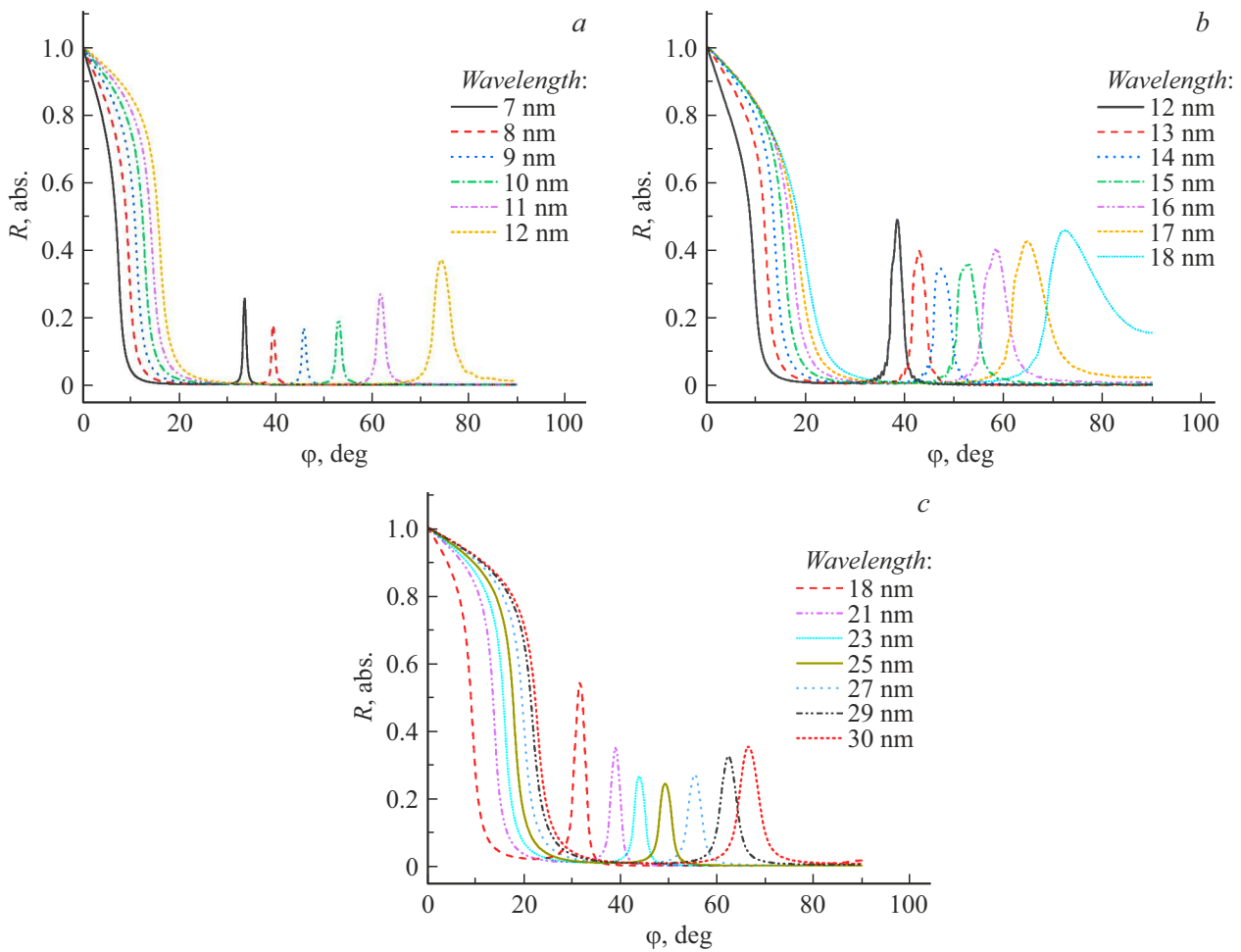


Рис. 3. Расчетные кривые угловых зависимостей отражения рентгеновского излучения от зеркал спектрометра: *a* — Mo/B4C ($d = 6.5 \text{ nm}$, $N = 60$) на диапазон длин волн 7–12 н; *b* — Mo/Be ($d = 10.0 \text{ nm}$, $N = 50$) на диапазон длин волн 12–18 н; *c* — Al/Be ($d = 14.0 \text{ nm}$, $N = 100$) на диапазон длин волн 18–30 н.

Таблица 1. Параметры МЗ Мо/Ве в зависимости от соотношения β

β	$R, \%$	$\delta\lambda, \text{ nm}$
0.1	35.6	0.6
0.2	44.4	0.92
0.3	45.9	1.2
0.4	44.3	1.35
0.5	41.2	1.4
0.6	34.8	1.35

Таблица 2. Параметры МЗ

Структура	$d, \text{ nm}$	β	N	$\Delta\lambda, \text{ nm}$	$\Delta\phi, \text{ }^\circ$	$\Delta\lambda, \text{ nm}$
Mo/B4C	6.5	0.4	100	7–12	24–52	< 0.5
Mo/Be	10.0	0.24	50	12–18	38–72	< 1.0
Al/Be	14.0	0.4	100	18–30	31–67	< 1.0

2. Зеркала спектрометра

На основе проведенных расчетов были синтезированы многослойные структуры. Зеркала изготавливались методом магнетронного напыления в технологической установке [5]. Нанесение пленочных покрытий производилось на стандартные суперполированные кремниевые подложки [6] в атмосфере Ag с рабочим давлением $\sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$. Таким образом, были синтезированы следующие 3 структуры:

1. Зеркало Mo/B4C (на диапазон длин волн $\Delta\lambda = 7\text{--}12 \text{ nm}$) с периодом $d = 6.5 \text{ nm}$.
2. Зеркало Mo/Be ($\Delta\lambda = 11\text{--}18 \text{ nm}$) с периодом $d = 9.8 \text{ nm}$.
3. Зеркало Be/Si/Al ($\Delta\lambda = 17\text{--}30 \text{ nm}$) с периодом $d = 18.2 \text{ nm}$.

Структура Be/Al была модифицирована за счет внесения в период дополнительного слоя Si в качестве антидиффузионного — барьерного слоя, положительное влияние которого на уменьшение ширины переходной

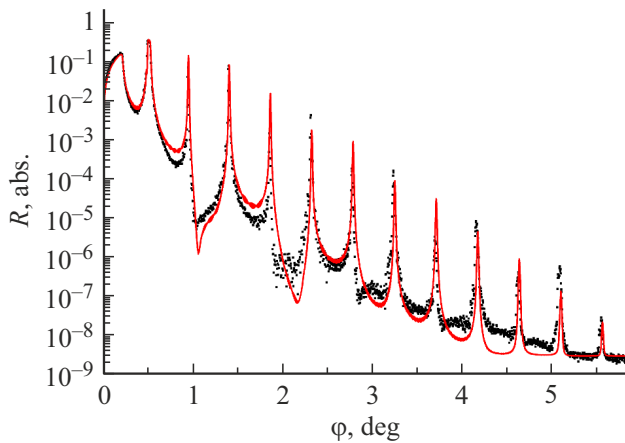


Рис. 4. Экспериментальная и теоретическая зависимости зеркального отражения рентгеновского излучения с энергией $E = 12 \text{ keV}$ от угла скольжения для МРЗ Mo/W4C. Точки — результаты измерений, сплошная линия — результат моделирования в программе Multifitting.

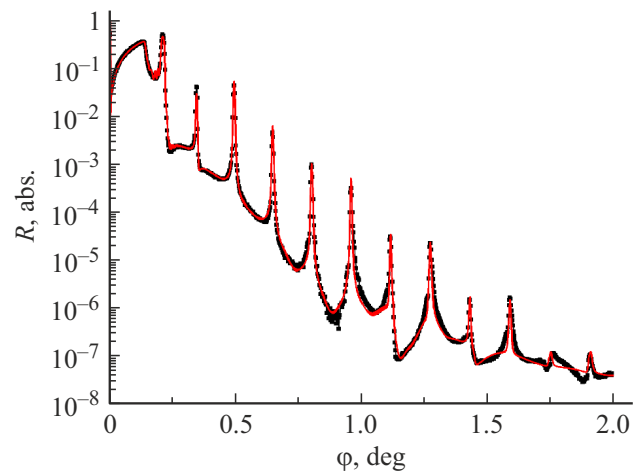


Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая зависимости зеркального отражения рентгеновского излучения с энергией $E = 12 \text{ keV}$ от угла скольжения для МРЗ Be/Si/Al. Точки — результаты измерений, сплошная линия — результат моделирования в программе Multifitting.

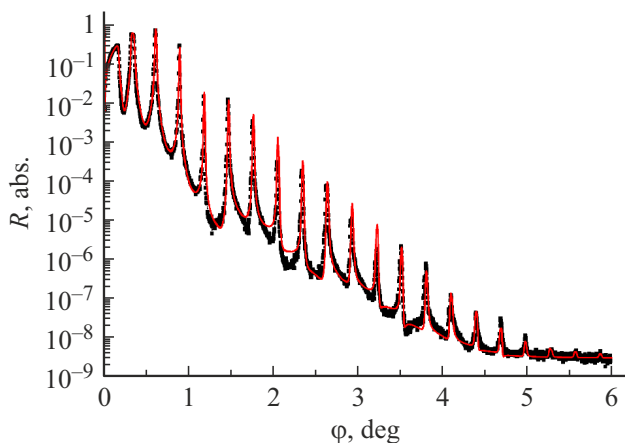


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая зависимости зеркального отражения рентгеновского излучения с энергией $E = 12 \text{ keV}$ от угла скольжения для МРЗ Mo/Be. Точки — результаты измерений, сплошная линия — результат моделирования в программе Multifitting.

области, а как следствие отражательные характеристики зеркала были показаны в работе [7].

Для восстановления спектральных характеристик источника рентгеновского излучения требуется аттестация отражательных характеристик МРЗ: определение пикового значения коэффициента отражения и спектральной ширины брэгговского максимума для всех длин волн внутри спектрального диапазона. Для решения данной задачи все МРЗ были исследованы на Курчатовском источнике синхротронного излучения „КИСИ Курчатов“ (Станция „ФАЗА“). По результатам исследования методом малоугловой рентгеновской рефлектометрии (энергия квантов $E = 12 \text{ keV}$) были восстановлены структурные параметры зеркал и с помощью фитирования кри-

вых отражения в программе Multifitting [4] рассчитаны спектральные характеристики в рабочем диапазоне длин волн. На рис. 4–6 представлены угловые зависимости отражения рентгеновского излучения с энергией 12 keV от структур Mo/W4C, Mo/Be и Be/Si/Al соответственно.

По данным рефлектометрических измерений на энергии излучения 12 keV с помощью программы Multifitting были определены структурные параметры многослойных рентгеновских зеркал (табл. 3).

Таким образом, были определены структурные параметры на все дисперсионные элементы, обозначенных выше поддиапазонов длин волн. Для каждого зеркала в программе Multifitting была рассчитана градуировочная кривая (зависимость отраженной длины волны от угла падения излучения), которая в свою очередь была проверена на нескольких длинах волн внутри рабочего диапазона с помощью лабораторного рентгеновского рефлектометра на базе рентгеновского спектрометра монохроматора РСМ-500 [8]. Пример угловых зависимостей коэффициента отражения для трех используемых в спектрометре зеркал на рабочих длинах волн в МР и ЭУФ диапазонах представлены на рис. 7.

Градуировочные кривые, кривые спектральной зависимости разрешения прибора (полуширина брэгговского максимума на полувьсоте) и пикового значения коэффициента отражения для всех трех структур представлены на рис. 8–10.

Как можно видеть, спектральная полоса пропускания многослойных структур для всего рабочего диапазона длин волн спектрометра ($\lambda = 6.6\text{--}30 \text{ nm}$) не превышает $\delta\lambda = 1 \text{ nm}$. Для зеркала Mo/W4C край поглощения бора не позволяет эффективно от-

Таблица 3. Структурные параметры МРЗ спектрометра

Структуры	Число периодов	Толщина периода, nm	Толщина слоя, nm	Ширина переходной области, nm
Mo/B4C	70	6.50	B4C–3.9	$\sigma(\text{Mo-on-B4C})-0.46$
			Mo–2.6	$\sigma(\text{B4C-on-Mo})-0.29$
Mo/Be	50	9.84	Be–7.5	$\sigma(\text{Mo-on-Be})-0.7$
			Mo–2.34	$\sigma(\text{Be-on-Mo})-0.29$
Be/Si/Al	40	18.2	Al–9.80	$\sigma(\text{Be-on-Al})-0.80$
			Si–1.0	$\sigma(\text{Al-on-Si})-0.60$
			Be–7.40	$\sigma(\text{Si-on-Be})-0.80$

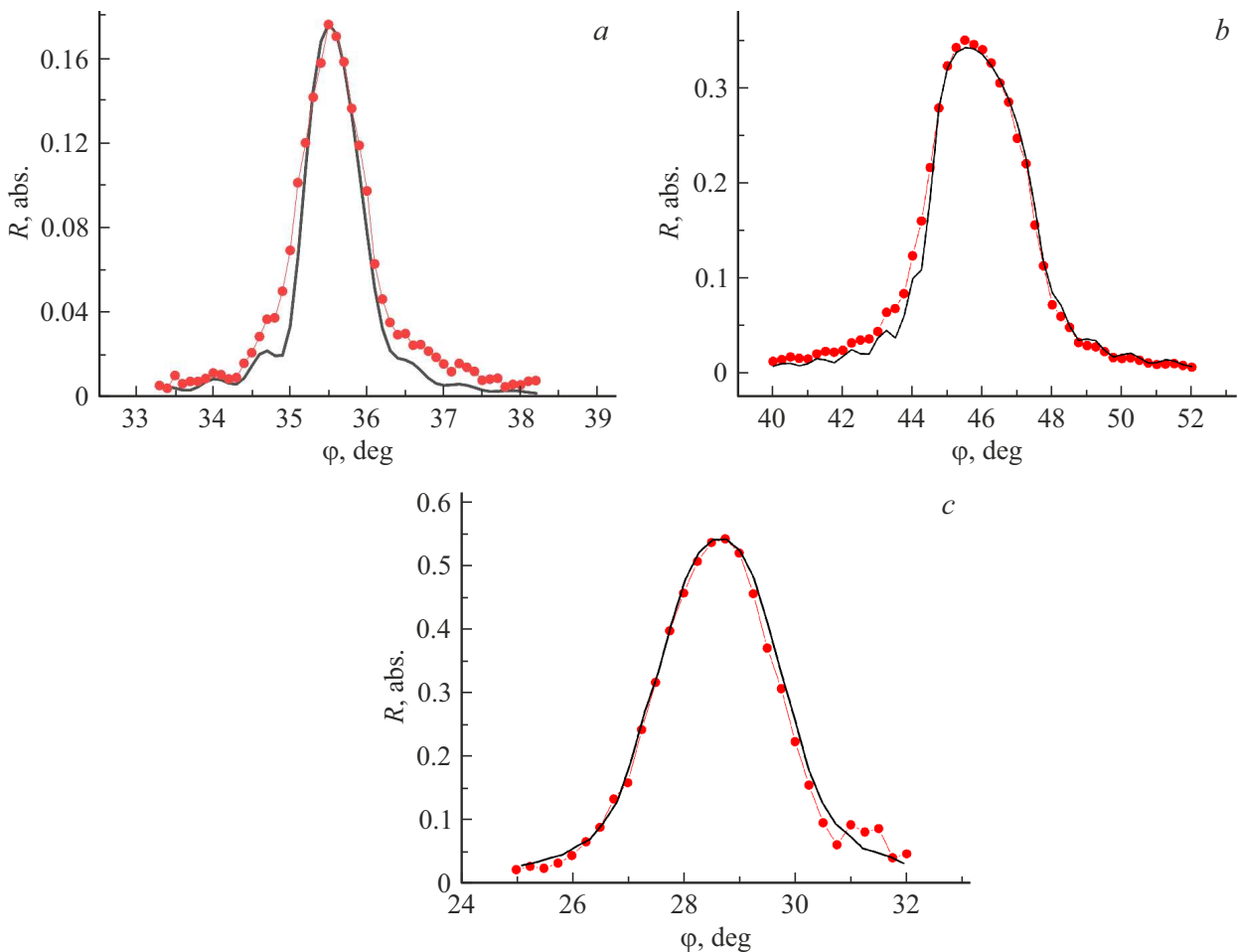


Рис. 7. Угловые зависимости коэффициента отражения МРЗ: *a* — Mo/B4C, на длине волн $\lambda = 7.22$ nm; *b* — Mo/Be, $\lambda = 9.34$ nm; *c* — Be/Si/Al, $\lambda = 11.4$ nm. Точки — результаты измерений, сплошная линия — результат моделирования в программе Multifitting.

ражать на длинах волн короче $\lambda = 6.6$ nm, поэтому измерения в этом поддиапазоне возможны только при углах падения излучения на МРЗ не менее 30° . Тем не менее во всем остальном спектраль-

ном диапазоне, который соответствует углам падения $30^\circ-75^\circ$ для МРЗ Mo/B4C и $20^\circ-75^\circ$ для двух других зеркал и длинам волн $\lambda = 6.6-30$ nm, спектрометр может эффективно использоваться для диагно-

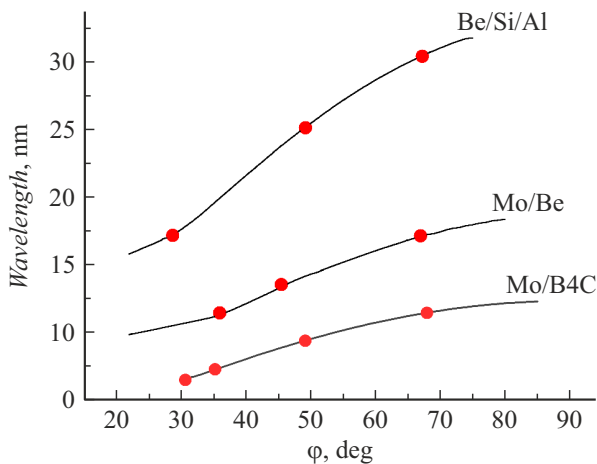


Рис. 8. Градуировочные кривые для зеркал Mo/B4C, Mo/Be и Be/Si/Al.

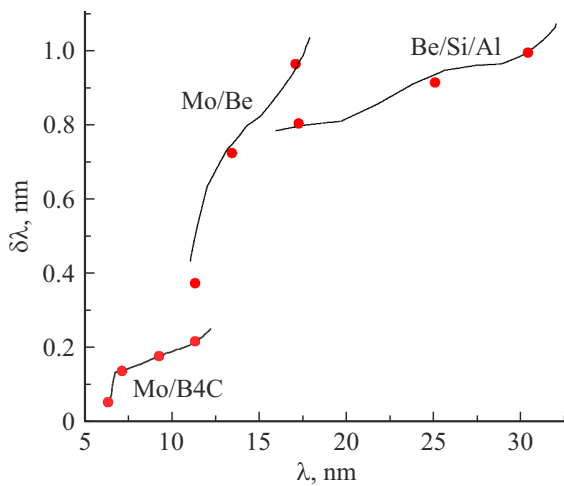


Рис. 9. Зависимость спектрального разрешения зеркал от длины волны. Точки — результаты измерений, сплошная линия — результат моделирования в программе Multifitting.

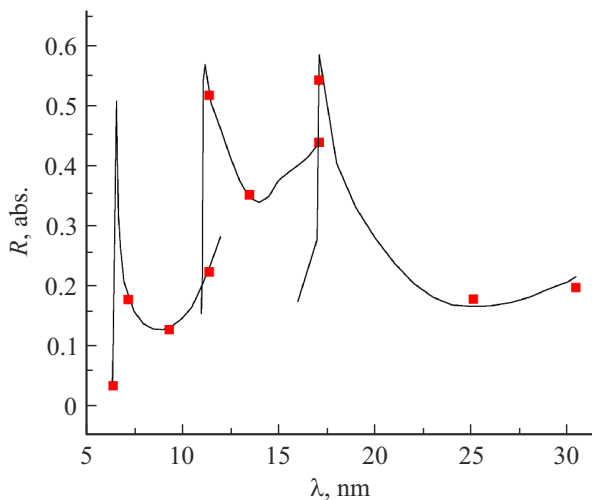


Рис. 10. Зависимость пикового значения коэффициента отражения зеркал от длины волны. Точки — результаты измерений, сплошная линия — результат моделирования в программе Multifitting.

стики спектрального состава источников МР и ЭУФ излучения.

Заключение

В рамках работы синтезированы и аттестованы многослойные рентгеновские зеркала, оптимизированные для задач спектроскопии в диапазоне длин волн 7–30 нм. Для всего рабочего диапазона длин волн спектрометра удалось получить высокие (более 10%) коэффициенты отражения при требуемом спектральном разрешении ($\delta\lambda \leq 1$ нм).

Весь спектральный диапазон спектрометра был разделен на 3 поддиапазона: 1) 6.6–12 нм, 2) 11–17 нм и 3) 16–30 нм. Для первого поддиапазона синтезирована многослойная структура на основе пары материалов Мо и В4С с периодом $d = 6.5$ нм и числом периодов $N = 60$. Структура обеспечивает коэффициенты отражения в диапазоне 6.6–12 нм более 12% при спектральной селективности $\delta\lambda = 0.1–0.25$ нм. Для второго поддиапазона — структура на основе пары материалов Мо и Ве с периодом $d = 9.83$ нм и числом периодов $N = 50$. Структура обеспечивает коэффициенты отражения в диапазоне 11–17 нм более 30% при спектральной селективности $\delta\lambda = 0.4–1.0$ нм. Для третьего поддиапазона — структура на основе пары материалов Al и Ве с периодом $d = 18.2$ нм и числом периодов $N = 40$. Структура обеспечивает коэффициенты отражения в диапазоне 16–30 нм более 15% при спектральной селективности $\delta\lambda = 0.8–1.0$ нм.

По результатам измерений на синхротроне и проверки на лабораторном рефлектометре для каждого зеркала были получены градуировочные кривые соответствия углу поворота зеркала длине волны излучения, пиковому значению коэффициента отражения и спектральной ширине брэгговского максимума. Таким образом, аттестация отражательных характеристик многослойных зеркал позволит не только производить однозначную привязку угла отражения к соответствующей ему длине волны излучения, но и с использованием аттестованного ранее детектора МР и ЭУФ излучения определять абсолютную интенсивность излучения источника на данной длине волны.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1361).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Е. Пестов, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Я. Лопатин, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, А.А. Соловьев, М.В. Стародубцев. *Материалы XXVI Международного симпозиума „Нанопфизика и наноэлектроника“* (Нижний Новгород, 2022), т. 1, с. 580.
- [2] П.Н. Аруев, М.М. Барышева, Б.Я. Бер, Н.В. Забродская, В.В. Забродский, А.Я. Лопатин, А.Е. Пестов, М.В. Петренко, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, В.Л. Суханов, Н.И. Чхало. *Квант. электрон.*, **42** (10), 943 (2012). [P.N. Aruev, M.M. Barysheva, B.Ya. Ber, N.V. Zabrodskaya, V.V. Zabrodskii, A.Ya. Lopatin, A.E. Pestov, M.V. Petrenko, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, V.L. Sukhanov, N.I. Chkhalo. *Quant. Electron.*, **42** (10), 943 (2012). DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014901]
- [3] Index of refraction [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html, свободный.
- [4] M. Svechnikov. *J. Appl. Cryst.*, **53**, 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X
- [5] В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало. *УФН*, **190** (1), 92 (2020). DOI: 10.3367/UFN.2019.05.038623 [V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo. *Phys. Usp.*, **63**, 83 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2019.05.038623]
- [6] АО „Телеком-СТВ“ [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.telstv.ru/?pageDen_silicon_wafers, свободный.
- [7] Р.С. Плешков, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, Р. Jonnard. *ЖТФ*, **90** (11), 1870 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55760.60-23 [R.S. Pleshkov, S.Y. Zuev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, R. Jonnard. *Tech. Phys.*, **65** (11), 1786 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110201]
- [8] M.S. Bibishkin, D.P. Chehonadskih, N.I. Chkhalo, E.B. Kluyenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Proc. SPIE.*, **5401**, 8 (2004). DOI: 10.1117/12.556949