

08

Оптимизация состава, синтез и изучение широкополосных многослойных зеркал для ЭУФ диапазона

© М.М. Барышева,¹ С.А. Гарахин,¹ С.Ю. Зуев,¹ В.Н. Полковников,¹ Н.Н. Салащенко,¹ М.В. Свечников,¹ Р.М. Смертин,¹ Н.И. Чхало,¹ Е. Meltchakov²

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

² Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School,
91127 Palaiseau, France
e-mail: mmbarysheva@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2019 г.

В окончательной редакции 28 марта 2019 г.

Принято к публикации 15 апреля 2019 г.

Разработаны и изготовлены широкополосные Mo/Si и Mo/Be многослойные зеркала стекового типа для диапазонов длин волн 11.1–13.8, 17–21 и 28–33 nm. Показано, что для таких структур равномерное отражение может быть достигнуто за небольшое число коррекций технологического процесса.

Ключевые слова: ЭУФ, широкополосные зеркала, аперодические зеркала, стековые структуры, рефлектометр с лазерно-плазменным источником.

DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48341.116-19

Введение

Многослойные рентгеновские зеркала с изменяющимся по глубине периодом и уширенной спектральной или угловой кривой отражения широко применяются в рентгенооптических исследованиях [1]. В солнечной астрономии они являются рабочим элементом спектрогелиографов [2], в спектроскопии лабораторной плазмы [3] позволяют собрать на порядок больше информации от исследуемого объекта благодаря высокому интегральному коэффициенту отражения; актуальны как элементы для транспортировки, коллимации и фокусировки аттосекундных импульсов электромагнитного излучения [4].

В настоящий момент разработано два принципиально разных подхода к дизайну многослойных зеркал, обладающих максимальным равномерным отражением в заданном спектральном диапазоне. В обоих случаях в качестве отправной точки берется периодическое многослойное зеркало (ПМЗ), образованное тонкими чередующимися слоями материалов с разной диэлектрической проницаемостью, однако „период“ структуры изменяется по глубине. В случае аперодической структуры (АМЗ) все слои имеют индивидуальную толщину. Распределение толщин в жестком рентгеновском диапазоне подчиняется степенному закону [5–7], или хаотическому, рассчитываемому численно [8,9] — в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах. Второй подход, так называемый стековый [10] (от английского *stack*): многослойное зеркало представляет собой несколько напыленных одно на другое ПМЗ с разными характеристиками: $\{N_i, d_i, \gamma_i\}$ количество периодов, величина периода, доля сильнопо-

глощающего вещества соответственно (i — номер ПМЗ в составе стековой структуры). С увеличением числа ПМЗ и $N_i = 1$ такая структура, очевидно, сводится к АМЗ. Отсюда же следует неизбежно меньшая гладкость кривой отражения оптимизированной стековой структуры и несколько меньшие коэффициенты отражения: при оптимизации состава АМЗ должен быть найден компромисс между гладкостью „полочки“ и ее высотой.

Плюсы стекового подхода определяются, прежде всего, технологией. Фактически, чтобы корректно напылить N различных толщин, необходимо провести порядка N калибровок, что в случае АМЗ с большим (несколько десятков) числом слоев оказывается чрезвычайно трудозатратным. Что касается решения обратной задачи, для классического АМЗ она практически нерешаема из-за большого числа параметров и неоднозначности полученного решения. В случае стекового многослойного зеркала (СМЗ) число восстанавливаемых параметров существенно меньше, обратная задача может быть достоверно решена, и проведена соответствующая коррекция технологического процесса. Приведенные соображения объясняют преимущество использования стекового дизайна при изготовлении широкополосных рентгеновских зеркал.

В ИФМ РАН имеется опыт изготовления аперодических широкополосных зеркал на основе пар материалов Mo/Si и Mo/Be для космической аппаратуры исследования солнца КОРТЕС [9,11]. Настоящая работа посвящена разработке и изготовлению стековых структур с равномерным отражением в диапазонах длин волн 11.1–13.8, 17–21 и 28–33 nm.

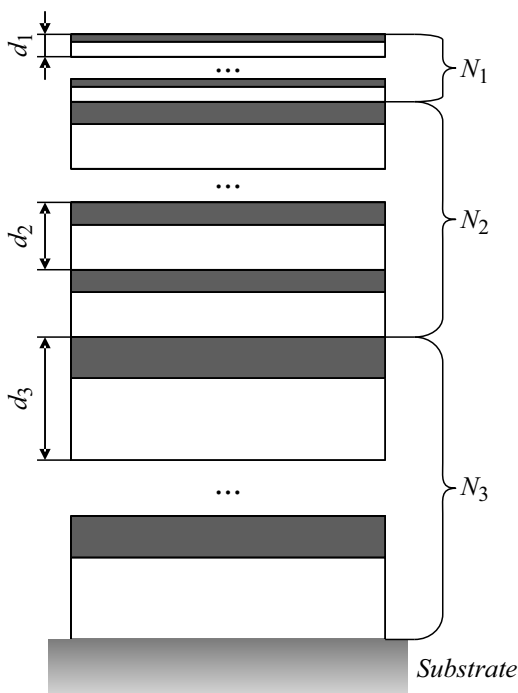


Рис. 1. Схема многослойного зеркала стекового типа.

1. Оптимизация состава стековых структур

Традиционной парой материалов, применяемой в диапазоне 12.5–35 нм является Mo/Si, однако в области 12.3–12.4 нм расположен край поглощения Si и в качестве „спейсера“ в этой области применяется Be. Таким образом, в диапазонах 17–21 и 28–33 нм были рассчитаны и изготовлены Mo/Si стековые зеркала, в диапазоне 11.1–13.8 нм — Mo/Be, как обладающие наибольшим экспериментально полученным коэффициентом отражения в этой области [12–14].

Схематическое изображение стековой структуры, состоящей из трех МПЗ, приведено на рис. 1. Поиск параметров СМЗ, обеспечивающих равномерное отражение в заданном диапазоне длин волн, представляет собой задачу многомерной оптимизации, сводящуюся к минимизации функционала

$$F = \int [R(\lambda) - R^{\text{target}}]^{2m} d\lambda,$$

где $R(\lambda)$ — зависимость коэффициента отражения от длины волны, R^{target} — целевая функция для коэффициента отражения (определяет высоту „плато“), интеграл вычисляется в области определения R^{target} . Процедура содержит несколько итераций, вначале высота „плато“ выбирается на уровне, соответствующем отражению МПЗ, и постепенно понижается до достижения удовлетворительной гладкости.

В качестве параметров оптимизации рассматривается набор $\{N_i, d_i, \gamma_i\}$, в случае использования защитного

покрытия или прослойки к варьируемым параметрам добавляются их толщины. Плотности материалов и характеристики интерфейсов считаются известными из экспериментов с периодическими зеркалами. Так, для пары Mo/Si ширины переходных областей, понимаемых в смысле среднеквадратичной шероховатости σ , составляют $\sigma = 1.2$ нм (Mo-на-Si) и $\sigma = 0.6$ нм (Si-на-Mo) [13], плотности пленок табличные. Случай Mo/Be изучен хуже [14–16], при расчетах мы закладывали $\sigma = 0.7$ нм (Mo-на-Be) и $\sigma = 0.3$ нм (Be-на-Mo). Как показано в [9], в случае аперидических зеркал результат решения задачи оптимизации будет существенно разным для нулевых и ненулевых значений σ , поэтому важно изначально учитывать реалистичные параметры переходных областей. Анализ, однако, показывает, что незначительное (порядка Å) отличие величин шероховатостей не должно приводить к драматическому искажению кривой отражения, т.е. строгое выполнение приведенных выше соотношений не необходимо.

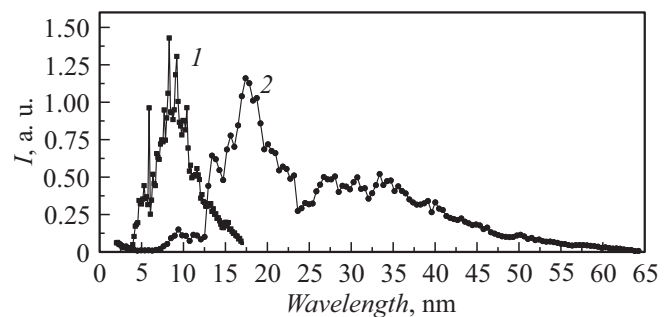


Рис. 2. Спектры источника излучения ЭУФ диапазона, промеренные дифракционными решетками 900 (1) и 300 (2) lines/mm.

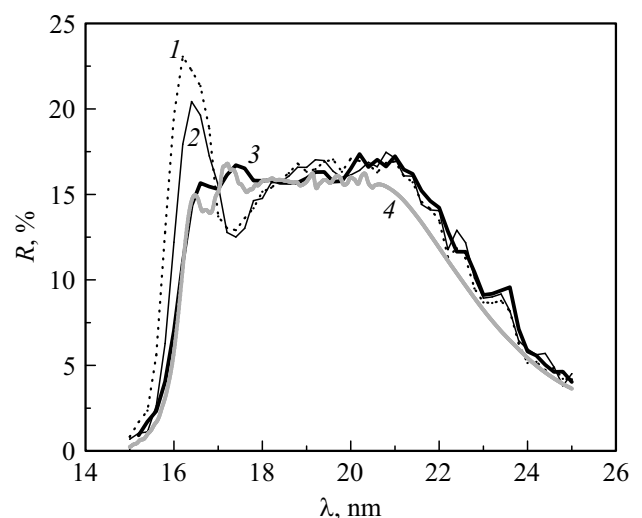


Рис. 3. Экспериментально полученные (1–3 — номера итераций) и расчетная (4) кривые отражения Mo/Si СМЗ, оптимизированных на равномерное отражение в диапазоне 17–21 нм.

Таблица 1. Расчетные и восстановленные толщины слоев Mo/Si CMЗ для диапазона 17–21 nm

Номер ПМЗ от поверхности	Число периодов, N_i	Материал	Толщины слоев ПМЗ, nm			
			Расчет	Первичная структура	1-я коррекция	Финальная коррекция
пленка Si	1	Si	1.40	1.40	1.40	1.40
1	3	Mo	4.30	4.34	4.33	4.34
		Si	6.72	6.66	6.66	6.72
2	3	Mo	3.43	3.35	3.35	3.44
		Si	5.37	5.21	5.21	5.39
3	32	Mo	4.50	4.30	4.40	4.52
		Si	4.50	4.30	4.40	4.52

Таблица 2. Расчетные и восстановленные параметры Mo/Si CMЗ для диапазона 28–33 nm

Номер ПМЗ от поверхности	Число периодов, N	Материал	Толщины слоев ПМЗ, nm	
			Расчет	Эксперимент
пленка Si	1	Si	5.3	7.6
1	2	Mo	5.58	4.81
		Si	10.36	10.99
2	1	Mo	10.57	11.12
		Si	12.5	13.09
2	5	Mo	5.62	5.45
		Si	12.5	12.49
2	1	Mo	5.62	6.63
		Si	15.21	16.49
3	20	Mo	4.95	4.68
		Si	13.38	13.20

Минимизация (1) осуществлялась при помощи алгоритма дифференциальной эволюции, реализованного в рамках программы Multifitting [17], в отличие от широко распространенной IMD [18] позволяющей рассматривать N_i в качестве параметра оптимизации. Мы не накладывали априорных ограничений на характер изменения d_i вглубь структуры, устанавливая на первом шаге достаточно широкий (избыточный с точки зрения условия Брэгга) и одинаковый для всех d_i диапазон изменения (например, 5–100 nm при диапазоне 28–33 nm). Из всех решений, соответствующих минимуму (1), оптимальными считались параметры, обеспечивающие максимальную гладкость кривой отражения в заданном спектральном интервале при максимально доступной высоте „полочки“.

Параметры рассчитанных CMЗ и соответствующие им кривые отражения можно видеть в таблицах 1–3 и на рисунках 3–7. Во всех приведенных случаях рассчитанные стековые структуры демонстрируют рост d_i к подложке

аналогично [10,19] (отметим, что в „жестком“ диапазоне наблюдается другая картина [20]). При этом верхние слои играют роль фильтра, подавляющие межстековые отражения и ослабляющие осцилляции кривой отражения зеркала.

2. Метод напыления

Образцы изготавливались методом магнетронного распыления в атмосфере аргона при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Торг; в качестве подложек использованы кремниевые пластины для микроэлектронной промышленности с эффективной шероховатостью в диапазоне пространственных частот $0.024\text{--}65 \mu\text{m}^{-1}$ $\sigma = 0.3$ nm [21]. Подробное описание напылительной установки содержится в [22]. Толщина осажденной пленки материала определяется временем прохождения подложки над мишенью и величиной тока на магнетроне, поэтому процессу изготовления зеркала предшествует процедура калиб-

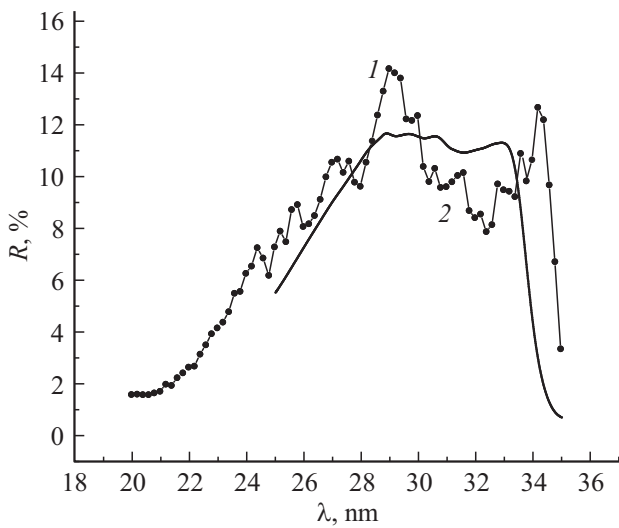


Рис. 4. Экспериментально полученная (1) и расчетная (2) кривые отражения Mo/Si CMЗ, оптимизированных на равномерное отражение в диапазоне 28–33 nm (первая итерация).

онная, требующая определения параметров зеркала и соответствующей коррекции процесса напыления.

3. Характеризация структур

Для контроля за технологическим процессом с целью его коррекции проводилась характеристика образцов методом малоугловой дифракции рентгеновских

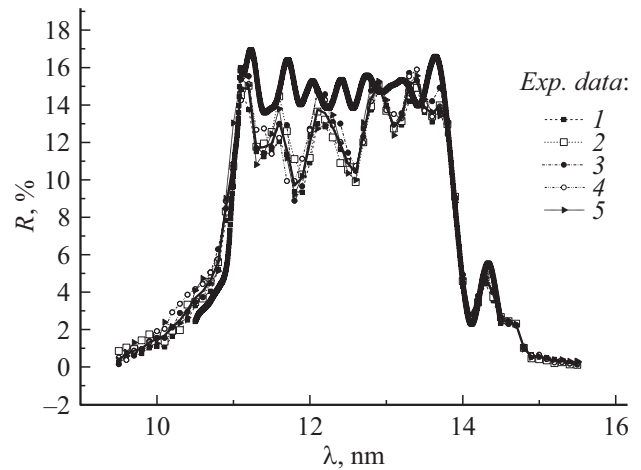


Рис. 6. Экспериментально полученные усреднением по пяти реализациям (1) и расчетная (2) кривые отражения Mo/Be CMЗ, оптимизированных на равномерное отражение в диапазоне 11.1–13.8 nm (сплошные линии).

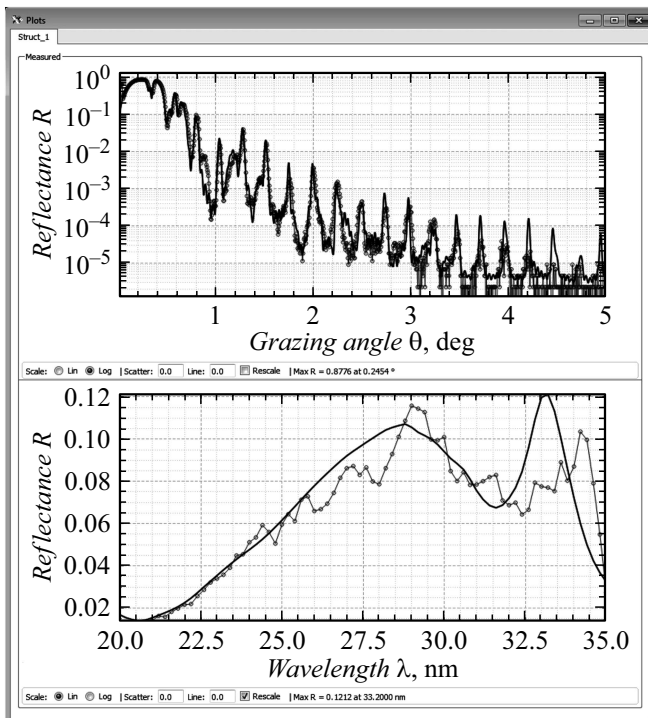


Рис. 5. Окно программы Multifitting: одновременная подгонка экспериментальных кривых отражения при $\lambda = 0.154$ nm и 20–35 nm Mo/Si CMЗ для 28–33 nm, теоретический расчет показан сплошной линией.

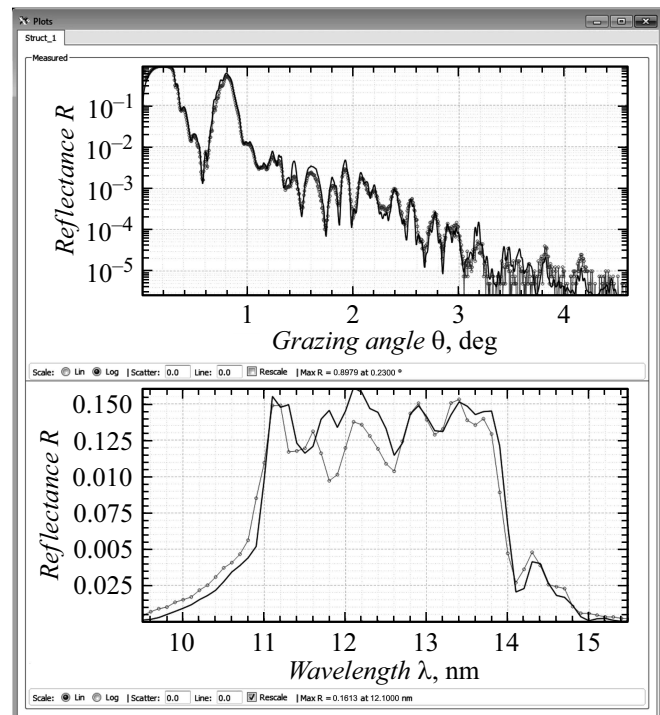


Рис. 7. Окно программы Multifitting: одновременная подгонка экспериментальных кривых отражения при $\lambda = 0.154$ nm и 9.6–15.2 nm Mo/Be CMЗ для 11.1–13.8 nm, теоретический расчет показан сплошной линией.

ровки. Однако неизбежный дрейф режима в установке, микропробой, незначительные изменения давления рабочего газа могут приводить к отклонению толщин пленок от заданных значений. Процедура изготовления многослойного покрытия, таким образом — итераци-

Таблица 3. Расчетные и восстановленные параметры Mo/Be СМЗ для диапазона 11.1–13.8 nm

Номер ПМЗ от поверхности	Число периодов, N	Толщины слоев ПМЗ, nm		
		Материал	Расчет	Эксперимент
1	2	Be Mo	2.72 2.22	BeO: 1.43 Be: 2.93 Mo: 2.22 Be: 26.8 Mo: 2.26
2	4	Be Mo	3.38 2.25	3.32 2.31
3	6	Be Mo	2.95 3.07	2.87 3.19
4	8	Be Mo	3.08 3.33	3.02 3.41
5	11	Be Mo	3.20 3.75	3.18 3.82
3	6	Be Mo	2.95 3.07	2.87 3.19
4	8	Be Mo	3.08	3.02
6	10	Be Mo	3.05 4.38	2.93 4.54

лучей на длине волны $\text{CuK}\alpha$ 0.154 nm с использованием дифрактометра PANalytical X'Pert Pro. Дифрактометр оснащен четырехкристалльным ассиметричным монохроматором Ge (220); образец закрепляется на столе с 6-ю степенями свободы, механика прибора обеспечивает точность установки углов на уровне 0.001° . Измерения проводились в диапазоне углов скольжения излучения на образец $\theta = 0-5^\circ$, доступный динамический диапазон по интенсивности рентгеновского пучка составляет 10^6 .

В рабочем ЭУФ диапазоне широкополосные зеркала изучаются на разработанном в ИФМ РАН рефлектометре, в котором монохроматизация излучения осуществляется с помощью высокоразрешающего спектрометра Черни–Тюрнера с плоской дифракционной решеткой и двумя сферическими коллимирующими зеркалами и лазерно-плазменным источником излучения [23]. В отличие от традиционно применяемых спектрометров-монохроматоров роуландовского типа такая схема, обладая высоким спектральным разрешением и широким рабочим диапазоном, сохраняет входную и выходную щели неподвижными, практически полностью снимая ограничения на массогабаритные характеристики источника излучения. Рефлектометр оснащен пятиосным гониометром, позволяющим изучать многослойные зеркала, нанесенные на криволинейные подложки.

Источником рентгеновского излучения в описываемом рефлектометре является высокоионизованная плаз-

ма, генерируемая при взаимодействии мощного лазерного пучка (плотность мощности $10^{11}-10^{12} \text{ W/cm}^2$) на твердотельную мишень. Для стабилизации эмиссионных характеристик необходимо избегать образования глубоких кратеров на мишени, что достигается ее постоянным смещением, поступательным линейным и вращательным. Сканирование по спектру осуществляется поворотом дифракционной решетки; калибровка спектра производится по краям поглощения свободновисящих фильтров Be, Al, MoZrSi_2 , MoSi_2 и ZrSi. Монохроматический зондовый пучок падает на тороидальное зеркало, формирующее на образце зондовый пучок размером $0.29 \times 0.16 \text{ mm}$. Расходимость пучка по горизонтали (в плоскости сканирования) составила 0.008° , по вертикали — 0.07° .

Спектры источника с мишенью из нержавеющей стали измерены в диапазоне 4–60 nm (рис. 2) с использованием дифракционных решеток 900 и 300 lines/mm (спектральное разрешение 0.03 и 0.06 nm соответственно). Первая решетка позволяет эффективно работать в диапазоне 5–15 nm, вторая — 9–24 nm, а при дополнительном использовании Al-фильтра для отсекающего второго порядка дифракции — вплоть до 34 nm. Для оценки точности измерений рефлектометра в диапазоне длин волн 11–14 nm было проведено сравнение спектральных и угловых зависимостей коэффициентов отражения Mo/Si и

Mo/Be зеркал с результатами, полученными на BESSY-2, которые показали совпадение в пределах $\pm 1.5\%$.

На основе данных, полученных в жестком и мягком рентгеновских диапазонах, решается обратная задача, для чего применяется авторская программа „Multifitting“ [18], позволяющая одновременно производить подгонку нескольких кривых отражения, полученных в разных частотных диапазонах. В качестве параметров подгонки выступают характеристики стеков, составляющих широкополосное зеркало: толщины и плотности материалов, шероховатости/масштабы переходных областей. После восстановления параметров реальной структуры, отличных от теоретически рассчитанных, производится коррекция процесса напыления.

4. Экспериментальные результаты и обсуждение

В рамках настоящей работы были синтезированы и изучены образцы широкополосных Mo-содержащих СМЗ, изготовленных по описанной выше схеме и оптимизированных на равномерное отражение в диапазонах длин волн 17–21, 28–33, 11.1–13.8 nm.

Mo/Si, 17–21 nm. Итерационная процедура напыления трех-стэкового Mo/Si широкополосного зеркала для диапазона 17–21 nm проиллюстрирована на рис. 3. При первом напылении кривая отражения далека от „полочки“, дифрактометрия в жестком диапазоне выявила заметное отклонение толщин зеркала от расчетных (табл. 1), однако последовательно проведенная процедура коррекции позволила за три итерации добиться „плато“ в области 17–21 nm. Плотность Mo составила 0.98 от табличного значения, плотность Si табличная. Значения шероховатостей для разных ПМЗ в составе стековой структуры составили $\sigma = 0.5–0.9$ nm (Mo-на-Si) и $\sigma = 0.2–0.5$ nm (Si-на-Mo). Обращает на себя внимание чувствительность кривой отражения к изменениям толщин пленок порядка 1 Å. В то же время незначительные отличия плотностей и значений шероховатости не приводят к заметному ухудшению вида кривой отражения, что важно с точки зрения решения прямой задачи, т.е. поиска оптимальных параметров СМЗ.

Mo/Si, 28–33 nm. Для диапазона 28–33 nm было рассчитано теоретически и изготовлено одно Mo/Si СМЗ, образованное тремя ПМЗ с прослойками Mo и Si оптимальной толщины (табл. 2). Для удобства напыления эта структура представлена более мелким разбиением на 5 ПМЗ (столбец 2 табл. 2). Спектральная характеристика экспериментального образца приведена на рис. 4, а на рис. 5 — подгонка кривых отражения в жестком и мягком рентгеновских диапазонах в программе Multifitting [17]. Можно видеть, что ошибки в толщинах слоев составили 0.5–1 nm, что будет учтено на следующей стадии работы со структурами данного типа. Плотности Si, Mo аналогично СМЗ для 17–21 nm

близки к табличным (толщины Mo находятся в диапазоне 5–10 nm, что существенно превышает характерную толщину кристаллизации для Mo), шероховатость также находится в рамках стандартных значений, наблюдается характерная для Mo/Si асимметрия границ.

Mo/Be, 11.1–13.8 nm. Серия измерений коэффициента отражения $R(\lambda)$ 6-стекового Mo/Be зеркала в диапазоне длин волн 10–15 nm приведена на рис. 6. Несмотря на изрезанный характер как спектра источника ЭУФ-излучения (рис. 2), так и самой кривой отражения, продемонстрирована хорошая воспроизводимость результатов измерений; погрешность составила 0.5%.

Для корректного описания вида кривых отражения (рис. 7), в том числе в области критического угла при $\lambda = 0.154$ nm, необходимо моделировать образование на поверхности зеркала окисла BeO толщиной 1.4 nm и „разбухание“ приповерхностного слоя приблизительно на 1 nm: вместо толщины $h(\text{Be}) = 2.72$ nm имеем $h(\text{Be} + \text{BeO}) = 3.82$ nm. Толщины остальных слоев, как показывает анализ, соответствуют расчетным с точностью до 0.15 nm (табл. 3), плотности материалов табличные, шероховатости составили $\sigma = 0.65$ nm (Mo-на-Be) и $\sigma = 0.36$ nm (Be-на-Mo). Кроме того, для улучшения отражательных характеристик Mo/Be стековых зеркал в диапазоне 11.1–13.8 nm в дальнейшем необходимо использовать защитное покрытие.

Выводы и заключение

Таким образом, в ИФМ РАН разработана методика расчета, изготовления и анализа многослойных структур стекового типа. Созданы и изучены экспериментальные образцы Mo/Si и Mo/Be, представляющие интерес для диагностики плазмы.

Для случая, когда была произведена последовательная корректировка технологических параметров, продемонстрировано хорошее совпадение теории и эксперимента. В течение трех коррекций задача была решена, что позволяет изготавливать широкополосные зеркала стекового типа для различных приложений рентгеновской оптики.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН I.1 „Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом“. Часть работ поддержана Российским фондом фундаментальных исследований: разработка Multifitting поддержана грантом № 18-32-00173, напыление экспериментальных образцов грантом 17-52-150006, измерение коэффициентов отражения на длине волны 0.154 nm — грантом № 18-32-00671.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Аперриодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона / Под ред. Е.Н. Рагозина. М.: Физматлит, 2018. 131 с.
- [2] *Shestov V., Ulyanov S., Vishnyakov E.* // SPIE. 2002. Vol. 9144. P. 91443G1.
- [3] *Yulin S.* // SPIE. 2002. Vol. 4782. P. 196–203.
- [4] *Вишняков Е.А., Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В.* // Квант. электрон. 2012. Т. 42. № 2. С. 143–152
- [5] *Joensen K.D., Gorenstein P., Wood J.L., Christensen F.E.* // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2279. P. 180–189.
- [6] *Kozhevnikov I.V., Bukreeva I.N., Ziegler E.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2001. Vol. 460. N 2–3. P. 424–443.
- [7] *Ziegler E., Bukreeva I.N., Kozhevnikov I.V., Pirozhkov A.S., Ragozin E.N.* // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3737. P. 386–395.
- [8] *Бейгман И.Л., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. № 3. С.167–171.
- [9] *Гайкович П.К., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И., Шеферс Ф., Соколов А.* // Квант. электрон. 2016. Т. 46. № 5. С. 406–413.
- [10] *Kuhlmann T., Yulin S., Feigl T., Kaiser N., Bernitzki H., Lauth H.* // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4688. P. 509–515.
- [11] *Ахсахалян А.Д., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др.* // Поверхность. Рент., синхр. и нейтр. исслед. 2017. № 1. С. 5–24.
- [12] *Banine V., Benschop J.P., Leenders M., Moors R.* // Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering. 2002. Vol. 3997. P. 126–135.
- [13] *Braun S., Mai H., Moss M., Scholz R., Leson A.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. Vol. 41. P. 4074–4081.
- [14] *Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Tatarskiy D.A., Salashchenko N.N., Schäfers F., Sertsu M.G., Sokolov A., Vainer Y.A., Zorina M.V.* // Opt. Express. 2018. Vol. 26. N 26. P. 33718–33731.
- [15] *Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko F., Schäfers N.N., Sertsu M.G., Sokolov A., Svechnikov M.V., Tatarsky D.A.* // Opt. Lett. 2017. Vol. 42. N 24. P. 5070–5073.
- [16] *Svechnikov M., Pariev D., Nechay A., Salashchenko N., Chkhalo N., Vainer Y., Gaman D.* // J. Appl. Cryst. 2017. Vol. 50. P. 1428–1440.
- [17] *Свечников М.В.* // Нанофизика и наноэлектроника. Матер. XXIII Междунар. симпозиума. 2019. Т. 1. С. 519–520.
- [18] *Windt D.* // Computers in Physics. 1998. Vol. 12. N 4. P. 360–370.
- [19] *Kuang S., Li S., Yang H., Huo T., Zhou H.* // Opt. Precision Engineer. 2018. Vol. 26. N 10. P. 2395–2406.
- [20] *Yao Y., Kunieda H., Wang Z.* // Opt. Express. 2013. Vol. 21. N 7. P. 8638–8651.
- [21] *Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А., Зорина М.В., Пестов А.Е., Рогачев Д.Н., Салащенко Н.Н., Струля И.Л., Чхало Н.И.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 71–76.
- [22] *Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.A., Chkhalo N.I., Gaponov S.V., Gusev S.A., Klunov E.B., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N., Schäfers F., Zuev S.Yu.* // Centr. Europ. J. Phys. 2003. Vol. 1. P. 191–209.
- [23] *Гарахин С.А., Нечай А.Н., Чхало Н.И., Салащенко Н.Н., Зув С.Ю., Забродин И.Г., Каськов И.А., Пестов А.Е., Полковников В.Н.* // Нанофизика и наноэлектроника. Матер. XXIII Междунар. симпозиума. 2019. Т. 1. С. 447–448.