

УДК 621.793.14

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН

© 2020 г. Ю. А. Вайнер^а, С. А. Гарахин^а, С. Ю. Зуев^а, А. Н. Нечай^а, Р. С. Плешков^а,
В. Н. Полковников^{а, *}, Н. Н. Салашенко^а, М. В. Свечников^а, М. Г. Сертсу^б,
Р. М. Смертин^а, А. Соколов^б, Н. И. Чхало^а, Ф. Шаферс^б

^аИнститут физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

^бHelmholtz-Zentrum Berlin, Albert-Einstein-Straße 15, Berlin, D-12489 Germany

*e-mail: polkovnikov@ipmras.ru

Поступила в редакцию 14.04.2019 г.

После доработки 25.04.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

Приводится обзор последних экспериментальных результатов, полученных при изучении бериллийсодержащих многослойных зеркал. Зеркала представляют интерес для проекционной нанолитографии, солнечной астрономии, рентгеновской микроскопии и других приложений. Показано, что для ряда диапазонов бериллийсодержащие многослойные зеркала по своим рентгенооптическим характеристикам превосходят имеющиеся в мире аналоги.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, многослойные зеркала, магнетронное распыление.

DOI: 10.31857/S1028096020020168

ВВЕДЕНИЕ

Развитие многослойной оптики мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) спектральных диапазонов 1–30 нм идет по пути улучшения оптических свойств элементов, в частности, характеристик отражения многослойных зеркал нормального падения. На сегодняшний день практически во всем рассматриваемом диапазоне длин волн достигнуты почти предельные величины. Разумеется, это утверждение относится к известным и используемым на практике сочетаниям материалов. Просматриваются возможности улучшения характеристик структур за счет применения дополнительных методов – инженерии переходных слоев, заключающихся в нанесении барьерных и аморфизирующих слоев, ионной полировке границ, ионном ассистировании в процессе нанесения пленок. Очевидно, что для традиционных пар материалов эти методы уже применяли, и на этом пути сложно ожидать прорывных результатов.

Как правило, высоких коэффициентов отражения удастся достичь вблизи краев поглощения химических элементов, на базе которых синтезируют структуры. Вдали от этих областей спектра эффективность отражающих покрытий может значительно снижаться. Например, в диапазоне длин волн 3–8 нм выделяется ограниченный на-

бор таких краев поглощения: Sc ($\lambda = 3.14$ нм), С ($\lambda = 4.47$ нм), В ($\lambda = 6.63$ нм), Y ($\lambda \sim 8$ нм). В области ЭУФ-излучения это Be ($\lambda = 11.1$ нм), Si ($\lambda = 12.4$ нм), Al ($\lambda = 17.1$ нм), Mg ($\lambda = 25$ нм). И если вблизи этих длин волн благодаря аномально низкому поглощению в непосредственной близости к краю поглощения многослойные зеркала на основе соответствующих материалов еще обеспечивают высокие коэффициенты отражения, то по мере удаления от края поглощения коэффициенты отражения заметно падают [1–3].

Обычно переход на качественно иной уровень осуществляется при внедрении новых пар элементов. В настоящей работе описываются последние результаты, полученные с многослойными зеркалами на основе бериллия. Ранее бериллий применялся в ЭУФ-диапазоне в качестве слабо поглощающего материала зеркала [4–8]. Однако, как показали эти работы, многослойные зеркала на основе Be обеспечили высокие (рекордные) коэффициенты отражения только в очень узком диапазоне длин волн 11.2–12.4 нм. На других длинах волн бериллийсодержащие зеркала уступали традиционным зеркалам на основе Si, Al и Mg. Поэтому интерес к этому материалу был утерян. Недавно в [9] было показано, что в диапазоне длин волн $\lambda > 17.1$ нм наблюдается уникальное сочетание мнимой и действительной ча-

стей показателя преломления бериллия, что позволяет использовать его в качестве рассеивающего материала и одновременно получать и рекордно высокие коэффициенты отражения, и спектральную селективность. Результаты теории были подтверждены на практике. Таким образом, поиск новых композиций многослойных зеркал на основе Ве для ЭУФ-диапазона крайне актуален.

Как один из наиболее легких химических элементов, бериллий характеризуется относительно малым поглощением в МР-диапазоне. У него только один край поглощения $\lambda_K = 11.1$ нм. Таким образом, в большей части МР-диапазона наблюдаются гладкие спектральные зависимости действительной и мнимой частей показателя преломления бериллия. Эти свойства указывают на хорошие перспективы применения бериллия в качестве слабо поглощающего материала для МР-диапазона. Работы по применению Ве в этом диапазоне авторам неизвестны.

Для проведения исследований с бериллием в ИФМ РАН была создана сертифицированная лаборатория, позволяющая изготавливать Ве-содержащие многослойные зеркала. В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты изучения отражательных характеристик многослойных зеркал на основе бериллия для диапазона длин волн 1–30 нм. Полученные результаты сравниваются с характеристиками традиционно применяемых в этом диапазоне многослойных структур.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Многослойные зеркала осаждаются на сверхгладкие (среднеквадратичная величина шероховатости 0.1–0.2 нм) кремниевые подложки методом магнетронного распыления. Процесс синтеза проводится на установке магнетронного напыления с четырьмя магнетронами. Это число определяет максимальное количество материалов, которые можно осадить в рамках одного технологического процесса. Распыление проводили в аргоне с чистотой 99.998% при давлении 0.08–0.13 Па. Равномерность толщины покрытий по поверхности подложек составляла величину не хуже 1%.

Параметры структур (период, индивидуальные толщины слоев, плотность элементов, межслоевую шероховатость) определяли методом подгонки одновременно кривых отражения, измеренных на длине волны 0.154 нм и в ЭУФ- и МР-диапазонах. Параметрами подгонки выступали: индивидуальные толщины пленок, плотности материалов пленок и межслоевые переходные области, в общем случае разные по форме и протяженности на разных границах элементарной ячейки многослойного зеркала. Эксперименты на длине волны 0.154 нм проводили на четырех-

кристалльном дифрактометре Philips X'Pert Pro. Методику восстановления структурных параметров многослойных зеркал по данным рентгеновского отражения можно найти в [10].

Измерения в МР- и ЭУФ-областях спектра проводили как на лабораторных рефлектометрах, так и на синхротроне BESSY-II. Использовали два лабораторных рефлектометра, оснащенных решеточными спектрометрами-монокроматорами РСМ-500 (спектральный диапазон измерений 0.8–25 нм, разрешение 0.01–0.03 нм в зависимости от диапазона) и ЛНТ-30 (диапазон 25–200 нм, разрешение 0.1 нм) [11]. Синхротронные измерения в ЭУФ-диапазоне были выполнены на трехосном рефлектометре на оптической линии накопительного кольца BESSY-II [12]. Изучали угловые, при фиксированной энергии фотонов, и спектральные, при фиксированном угле падения излучения, зависимости коэффициентов отражения многослойных зеркал.

Кроме дифрактометрических и рефлектометрических измерений образцы изучали методом просвечивающей электронной микроскопии и вторичной ионной масс-спектропии на установке TOF.SIMS-5. Поперечные срезы были подготовлены на установке Quanta 3D FEG с использованием технологии фокусирующего ионного пучка, описанной, например, в [13]. Измерения проводили с помощью высокочастотного электронного микроскопа LIBRA 200 МС.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАПАЗОНА 11.2–17.1 нм

Поскольку K -край поглощения бериллия соответствует длине волны 11.2 нм, в диапазоне длин волн больше 11.2 нм бериллий является одним из наиболее прозрачных материалов. На рис. 1 приведены дисперсионные зависимости действительной и мнимой поправок показателей преломления $n = 1 - \delta + i\gamma$ для кремния и бериллия. Из приведенных зависимостей следует, что в диапазоне 11.2–12.4 нм бериллий остается безальтернативным слабо поглощающим элементом, на основе которого можно создавать многослойные зеркала. В диапазоне $\lambda > 12.4$ нм оптический контраст кремния лучше (меньшая величина δ) по сравнению с рассеивающими элементами (в роли которых могут выступать, например, молибден, рутений, цирконий). Однако поглощение бериллия меньше (меньшая величина γ), что позволяет рассматривать его как конкурента кремния, традиционно применяемого в этой области длин волн. Зеркала на основе бериллия давно привлекали к себе внимание, прежде всего, благодаря теоретической возможности обеспечения пика отражения выше 70% вблизи края поглощения этого элемента ($\lambda = 11.1$ нм). Например, в [4–6] изучали структуры Mo/Ве, оптимизированные на

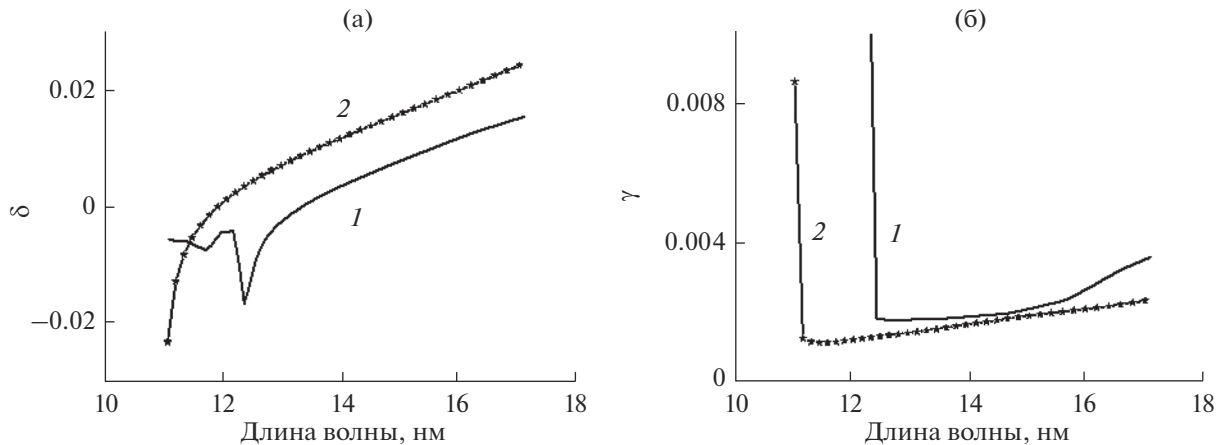


Рис. 1. Дисперсионные зависимости действительной и мнимой поправок показателей преломления $n = 1 - \delta + i\gamma$ для кремния (1) и бериллия (2).

спектральный диапазон вблизи 11.2 нм. Наилучший пиковый коэффициент отражения получен в [6]. Он составил 70.15% на длине волны 11.34 нм.

Важно отметить, что теоретически как пиковый, так и интегральный коэффициенты отражения многослойных зеркал, оптимизированных для данного диапазона, оказываются выше для структур на основе Ru и Be, а также для трех- и четырехкомпонентных зеркал. Численное моделирование подобных структур, проведенное в [7], показало, что теоретически пиковые коэффициенты отражения многослойных зеркал типа Ru/Sr–Be и Ru–Mo/Be на длине волны 11.3 нм могут превосходить 80%. Экспериментально многослойные зеркала на основе сплава Ru–Mo и Be изучали в [8]. Получены следующие отражательные характеристики зеркала: $R = 69.3\%$ на длине волны 11.4 нм, $\Delta\lambda = 0.35$ нм. Коэффициенты отражения Be-содержащих зеркал существенно ниже теоретического предела. Тем не менее, достигнутый пиковый коэффициент отражения 70.15% превосходит стандартно получаемые коэффициенты отражения $R = 69–70\%$ для зеркал на основе Mo/Si (в том числе и с барьерными слоями на основе V_4C и C), применяемых в оптических схемах установок литографии с рабочей длиной волны 13.5 нм [13–18].

На рис. 2 приведена угловая зависимость коэффициента отражения зеркала Mo/Be в области 11 нм, изготовленного в лаборатории. Измерения проведены на BESSY-II. Как можно видеть, пиковый коэффициент отражения на длине волны 11.3 нм составил рекордную величину $R = 70.25\%$, что, однако, далеко до предела. Причиной относительно невысокого коэффициента отражения являются протяженные переходные области на границах раздела пленок. Длина переходного слоя на границе Mo-на-Be составила 0.71 нм, в то время как Be-на-Mo – 0.36 нм.

С целью повышения коэффициентов отражения Mo–Be было изучено влияние прослоек C, V_4C и Si на переходные области и, соответственно, коэффициенты отражения в области 11 нм. К сожалению, применение прослоек только немного понизило коэффициенты отражения до 67–69%. Однако был обнаружен эффект сглаживания межслоевых шероховатостей и, соответственно, ширин переходных областей при нанесении кремниевых прослоек на бериллиевые пленки (структура Mo/Be/Si). Из-за сильного поглощения Si сразу за краем поглощения этот эффект не привел к увеличению коэффициента отражения в окрестности длины волны 11 нм. Однако, как показали расчеты, он мог положительно повлиять на коэффициенты отражения Mo/Be/Si M3 в области 13 нм.

В [19] продемонстрирован эффект улучшения отражательной способности Mo/Si при внедре-

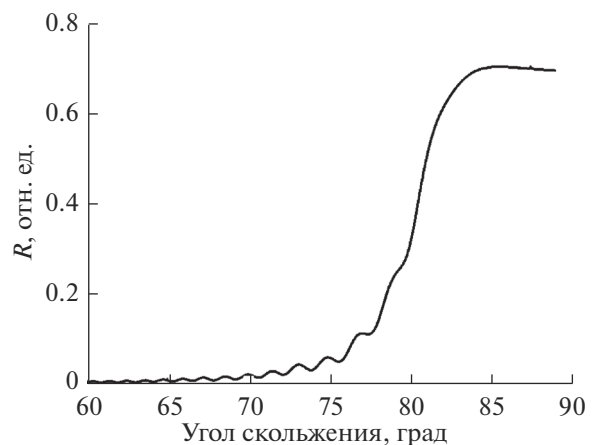


Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента отражения зеркала Mo/Be ($\lambda = 11.3$ нм).

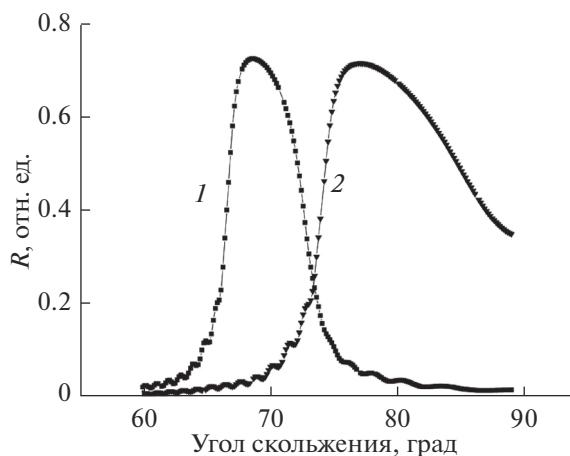


Рис. 3. Угловые зависимости коэффициентов отражения зеркала Mo/Be/Si, снятые на длине волны: 12.9 (1); 13.5 нм (2).

нии в систему Be в качестве промежуточного слоя. Показано, что осаждение слоя бериллия на поверхность молибдена приводит к сглаживанию и границы (Mo-на-Si) до шероховатости порядка 0.6 нм. В то же время граница Be-на-Mo оценивается как 0.4 нм. В результате в работе удалось достичь коэффициентов отражения более 71% при $\lambda = 13.5$ нм и почти 73% на длине волны $\lambda = 129$ нм (рис. 3). Этот результат на 1.5–2% превосходит ранее полученные рекордные коэффициенты отражения многослойных зеркал Mo/V₄C/Mo/V₄C [18]. Но и двойная система Mo/Be имеет преимущества при использовании ее в диапазоне длин волн больше 12.4 нм. Благодаря меньшему поглощению бериллия и меньшему оптическому контрасту между бериллием и молибденом (относительно контраста между кремнием и молибденом) на основе этой пары можно получать многослойные зеркала, для которых наблюдается меньшая ширина пика отражения на половине высоты $\Delta\lambda_{1/2}$. Это особенно важно для астрофизических приложений, когда возникает задача эффективного выделения линии, например, ионов FeXXIII, FeXX ($\lambda = 13.2$ нм) из солнечного спектра.

В [20] показано, что при одинаковой величине $\Delta\lambda_{1/2} = 0.35$ нм наилучшее отражение (58%) демонстрируют структуры Mo/Be. Структуры Mo/Si, оптимизированные для достижения $\Delta\lambda_{1/2} = 0.35$ нм, дают коэффициент отражения 54%. С учетом двух отражений в телескопе Ричи–Кретьена выигрыш в светосиле составит около 20%. По этой причине можно рассматривать пару Mo/Be как альтернативу Mo/Si в спектральной области около 13 нм, а не только в области 11.1–12.4 нм. Можно также надеяться на прогресс в увеличении коэффициентов отражения многослойных зеркал Mo/Be и в области 11 нм. В [21]

было показано, что при отжиге зеркал Mo/Be в вакууме при температуре 300°C коэффициент отражения на длине волны 11.34 нм вырос примерно на 2.5%. В работе исследовано относительное увеличение коэффициента отражения, так как измерения проводились только на лабораторном рефлектометре.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАПАЗОНА 17.1–25 нм

Задачи солнечной астрономии в диапазоне длин волн $\lambda = 17.1$ –25 нм акцентируются на излучении ионов FeXII–FeIX (17.1–19.5 нм). Их регистрация, в частности, используется для обнаружения активных областей короны, ответственных за формирование микровспышек, которое является одним из самых мелкомасштабных процессов энерговыделения в атмосфере Солнца. Их природа и происхождение остаются предметом научных исследований и дискуссий. Для решения этой проблемы в настоящее время разрабатывается обсерватория “АРКА”, которая должна обеспечивать рекордно высокое пространственное, спектральное и временное разрешение [22].

Базовым слабо поглощающим материалом для многослойных зеркал в спектральной области $\lambda = 17.1$ –25 нм является алюминий, L -край поглощения которого соответствует длине волны $\lambda_L = 17.04$ нм. Выбор рассеивающих материалов довольно широк. В табл. 1 представлены наиболее эффективно отражающие многослойные зеркала для этого диапазона (зеркала оптимизированы на $\lambda = 17.1$ нм). Для эффективного подавления близко лежащих линий (например, в случае канала регистрации 17.1 нм необходимо отклонение от 17.5 нм и наоборот) спектральная полоса пропускания многослойных зеркал для каналов 17.1 и 17.5 нм высокоразрешающих обсерваторий не должна превышать 0.4 нм. Для канала регистрации 19.5 нм это требование менее жесткое: предельное $\Delta\lambda_{1/2} < 1$ нм (для отклонения от 17.5 нм слева и от 21 нм справа). Из табл. 1 следует, что ни одно из ранее использовавшихся в астрофизических экспериментах многослойных зеркал, даже Si/Al, не удовлетворяет новым требованиям к ограничению спектральной полосы пропускания. Таким образом, возникает задача поиска и синтеза новых структур, для которых $\Delta\lambda_{1/2}$ не превышала бы заданных значений. Для сохранения временного разрешения телескопов желательно иметь коэффициенты отражения не ниже ранее достигнутых.

На рис. 4 приведены дисперсионные зависимости поправок к действительной (δ) и мнимой (γ) частям показателя преломления циркония, кремния, алюминия и бериллия в диапазоне $\lambda = 17$ –22 нм. Из рисунка видно, что скачок дей-

ствительной части показателя преломления на границе Be–Al выше, чем у Si–Al, что указывает на то, что для многослойных зеркал Be/Al можно ожидать более высокого, чем у зеркал Si/Al коэффициента отражения. А так как поглощение Be мало, то можно ожидать и высокую спектральную селективность.

Теоретические расчеты показывают (рис. 5), что с точки зрения максимума коэффициента отражения наибольший интерес представляет четырехкомпонентная структура Zr/Be/Si/Al (порядок материалов от подложки к поверхности). Be/Al характеризуется близкими к Si/Al спектральной селективностью ($\Delta\lambda_{1/2} = 0.45$ нм) и к Zr/Al пиковым коэффициентом отражения (68.8%). С результатами исследований рентгенооптических свойств многослойных зеркал Be/Al можно ознакомиться в [9]. В табл. 2 представлены основные результаты этой работы. Порядок материалов указан в направлении от подложки к поверхности. Измеренная полуширина пика отражения составила 0.4 нм. Здесь обращает на себя внимание сглаживающий эффект тонких (0.7–1 нм) слоев кремния. Межслоевая шероховатость двухкомпонентной структуры Be/Al составляла величину $\sigma = 1.3$ нм. Осаждение Si на поверхность Be приводит к сглаживанию шероховатости на всех границах до 0.6 нм. Этот факт можно объяснить аморфизацией металлических пленок. Благодаря перемешиванию кремния и алюминия в процессе роста пленки Al кристаллиты не успевают развиться до тех же размеров, которые характерны для многослойных зеркал Al/Be.

В настоящей работе проведены эксперименты с аморфизацией слоев структуры Zr/Al. Были изучены двухкомпонентные многослойные зеркала Zr/Al и образцы типа Zr/Si/Al с тонкими (0.8 нм) буферными слоями кремния, осажденного на поверхность циркония. Измерения про-

Таблица 1. Измеренные отражательные характеристики различных многослойных зеркал в окрестности $\lambda = 17.1$ нм

Зеркало	R, %	$\Delta\lambda_{1/2}$, нм
Mo/Si [23]	54	0.875
Al/Mo/SiC [24, 25]	53.4	0.76
Al/Mo/B4C [24, 25]	55.5	0.875
Zr/Al [20]	56	0.6
Si/Al [20]	48	0.48

Таблица 2. Экспериментально полученные коэффициенты отражения зеркала Be/Al с прослойками Si и без них ($\lambda = 17.1$ нм)

Зеркало	$R_{\text{эксп}}$, %
Be/Al	47
Al/Si/Be	51
Be/Si/Al	61
Be/Si/Al/Si	56

водились на длине волны 17.1 нм. Для зеркал Zr/Al получены результаты, повторяющие приведенные в табл. 1 ($R = 56\%$). Отражение же от трехкомпонентной структуры составило 57.8%.

Далее изучали четырехкомпонентную структуру Zr/Be/Si/Al. Толщины материалов оптимизированной на максимум отражения структуры: $d_{\text{Zr}} = 3.5$ нм, $d_{\text{Be}} = 1.2$ нм, $d_{\text{Si}} = 0.7$ нм, $d_{\text{Al}} = 4$ нм. Результаты измерений отражения от этого зеркала на длинах волн 17.1, 17.38, 17.63 и 17.9 нм приведены на рис. 6. Измеренная величина $\Delta\lambda_{1/2} = 0.6$ нм. Как и следовало ожидать, наибольшее отражение (66.7%) зафиксировано на длине волны $\lambda = 17.14$ нм, наиболее близкой к краю поглощения алюминия.

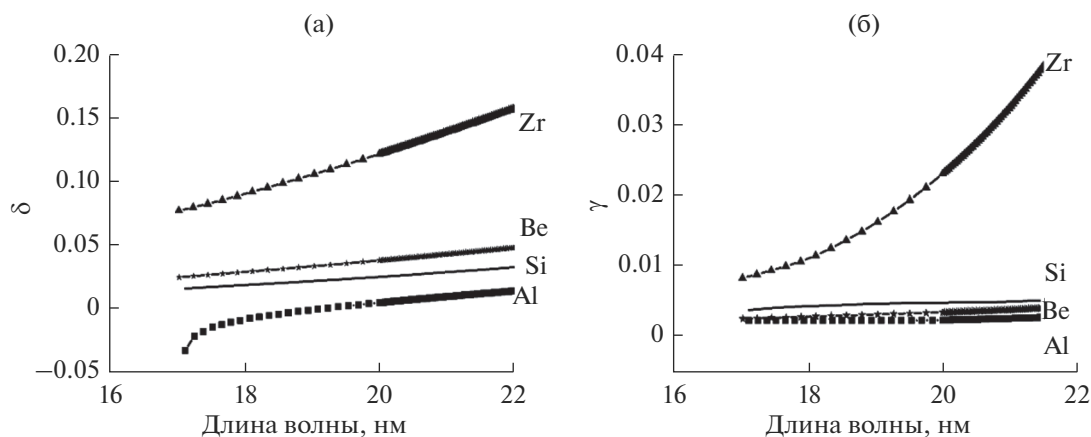


Рис. 4. Дисперсионные зависимости действительной и мнимой поправок показателей преломления $n = 1 - \delta + i\gamma$ для алюминия, циркония, кремния и бериллия.

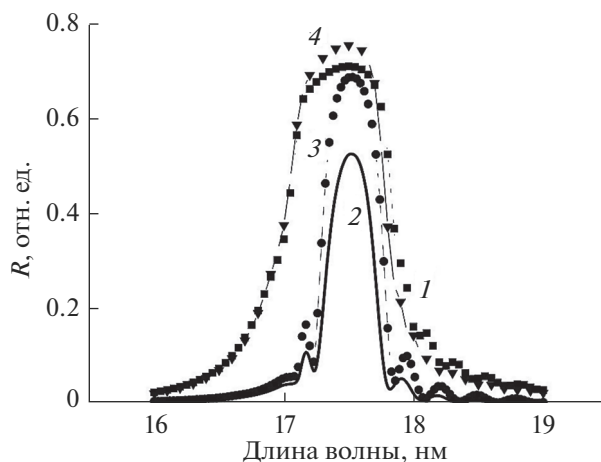


Рис. 5. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения многослойных зеркал Zr/Al (1), Si/Al (2), Be/Al (3) и Zr/Be/Si/Al (4) при нормальном падении. Расчеты сделаны для “идеальных” структур с табличной плотностью материалов и нулевой межслоевой шероховатостью, состав которых оптимизирован на максимум коэффициента отражения.

Это значение существенно превосходит коэффициент отражения и для Zr/Al (56%), и для Be/Si/Al (61%), о которых сообщалось ранее [9, 20]. На данный момент — это наибольшее отражение, экспериментально достигнутое для многослойных зеркал, оптимизированных на длину волны 17.1 нм. Также отражательные характеристики зеркал Zr/Si/Al и Zr/Be/Si/Al изучали на $\lambda = 19.5$ нм. Экспериментально измеренные значения приведены в табл. 3.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ОКРЕСТНОСТИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 30.4 нм

Другой наиболее информативной линией излучения в спектре Солнца является линия иона HeII ($\lambda = 30.4$ нм, температура возбуждения (4×10^4)– 10^5 К). Она важна и с точки зрения диагностики высокотемпературной плазмы токамаков. В связи с этим представляется важной задача изготовления многослойной рентгеновской оптики нормального падения, предназначенной для диапазона длин волн в окрестности $\lambda = 30.4$ нм. Традиционно для этой цели широко применялись многослойные зеркала на основе пары мате-

Таблица 3. Экспериментально полученные отражательные характеристики многослойных зеркал Zr/Si/Al и Zr/Be/Si/Al ($\lambda = 19.5$ нм)

Зеркало	$R_{\text{эксп}}, \%$	$\Delta\lambda_{1/2}, \text{нм}$
Zr/Si/Al	53	0.77
Zr/Be/Si/Al	55	0.61

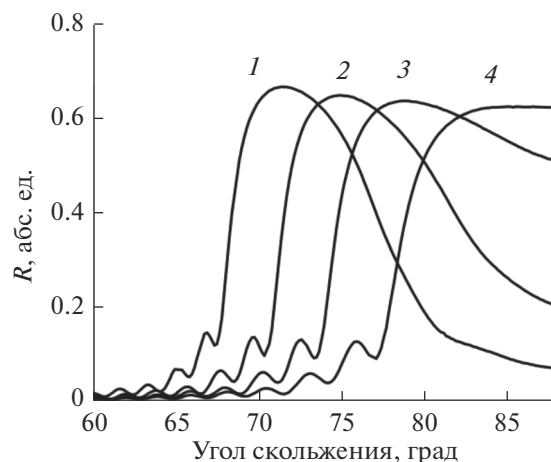


Рис. 6. Экспериментальные угловые зависимости коэффициента отражения многослойных зеркал Zr/Be/Si/Al, снятые на длине волны: 17.14 (1); 17.38 (2); 17.63 (3) и 17.9 нм (4).

риалов Mo/Si (пиковый коэффициент отражения $R = 20$ – 25% , спектральная селективность $\lambda/\Delta\lambda \approx 10$) [26]. Однако использование таких структур затруднено в связи с рядом их недостатков. Во-первых, в астрономических приложениях относительно невысокая спектральная селективность не позволяет отсеять излучение достаточно яркой линии FeXV = 28.4 нм. Вторая проблема — наложение линий ионов Fe в спектральной области 17.1–17.5 нм на второй интерференционный максимум отражения Mo/Si-покрытия.

Как альтернатива зеркалам на основе Mo/Si, рассматриваются многослойные структуры на основе Mg. Использование Mg в качестве слабо поглощающего элемента в многослойной структуре имеет ряд особенностей. Рабочий диапазон длин волн лежит за L -краем поглощения Mg ($\lambda_L = 25$ нм), что позволяет надеяться на более высокую отражательную способность. Второй интерференционный максимум таких структур приходится на диапазон длин волн $\lambda < \lambda_L$, что существенно снижает коэффициенты отражения зеркал в этой области из-за сильного поглощения излучения в слоях магния. Однако недостатком материала Mg является его высокая химическая активность и, в частности, подверженность окислению. В [27] отмечается стремительное ухудшение отражательных характеристик зеркал Si/Mg. Нанесение барьерных слоев из Cr и V_4C позволило частично решить проблему. Но все равно имеет место снижение пикового значения коэффициента отражения от 38 до 30%. Это значение сохраняется, по крайней мере, в течение пяти лет.

Такой же неустойчивой можно признать структуру SiC/Mg. При начальном отражении 42–44% ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) в [28] зафиксировано сниже-

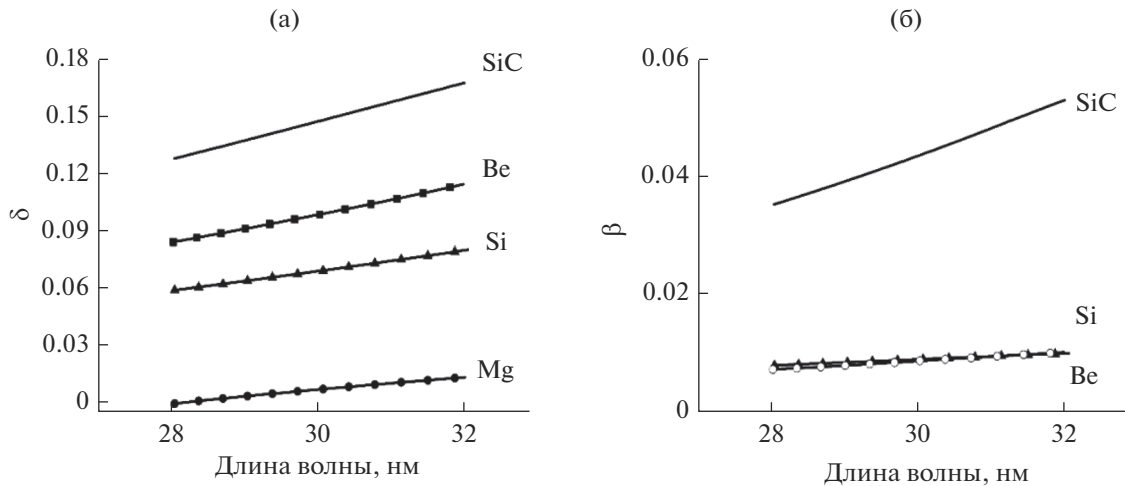


Рис. 7. Спектральные зависимости действительной (а) и мнимой (б) добавок к показателям преломления $n = 1 - \delta + i\gamma$.

ние до 30% за пять лет. Выходом из сложившейся ситуации является поиск альтернативных структур, одновременно обладающих стабильными характеристиками и удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к оптике современных солнечных телескопов. Требования же для зеркал телескопов следующего поколения, оптимизированных на 30.4 нм, формулируются следующим образом: пиковое значение коэффициента отражения не менее 25%, ширина пика отражения на половине высоты $\Delta\lambda_{1/2} < 1$ нм (для эффективного подавления линий Fe с длинами волн 28.4 и 33.5 нм).

В настоящей работе изучены альтернативные Be-содержащие зеркала для 30.4 нм, а именно зеркала Be/Al с буферным слоем Si и Be/Mg с защитным покрытием Al. На рис. 7 приведены спектральные зависимости действительной и мнимой добавок к показателям преломления ($n = 1 - \delta - i\beta$) наиболее часто используемых рассеивающих материалов для магнийсодержащих зеркал в сравнении с бериллием. Из приведенных зависимостей следует, что бериллий, близкий к кремнию по поглощению, превосходит его по оптическому контрасту относительно магния. Карбид кремния обладает большей рассеивающей способностью, однако его поглощение существенно больше, чем у бериллия. Таким образом, исходя из краткого анализа оптических свойств можно сказать, что бериллий – наиболее привлекательный рассеивающий материал для магнийсодержащих многослойных зеркал.

На рис. 8 приведены теоретические спектральные зависимости коэффициентов отражения наиболее оптимальных с точки зрения максимума отражения зеркал на основе магния и структуры Be/Al. В табл. 4 представлены пиковые значения коэффициентов отражения R этих зеркал, а также ширины пиков отражения на половине вы-

соты $\Delta\lambda_{1/2}$. Номинально уступая в отражении магниевым зеркалам, структуры Be/Al характеризуются одним из лучших значений спектральной селективности (отношение $\lambda/\Delta\lambda$). Кроме того, изучение зеркал Be/Si/Al (последовательность материалов дана в направлении от подложки к поверхности), оптимизированных на длину волны 17.1 нм, показало высокую временную стабильность отражательных характеристик при таком сочетании материалов.

На рис. 9 приведены угловые зависимости коэффициента отражения многослойных зеркал Be/Si/Al, снятые на длине волны 30.4 нм сразу после напыления, через восемь и через 20 мес. Как видно из рисунка, за 20 мес. хранения на воздухе коэффициент отражения изменился не более чем

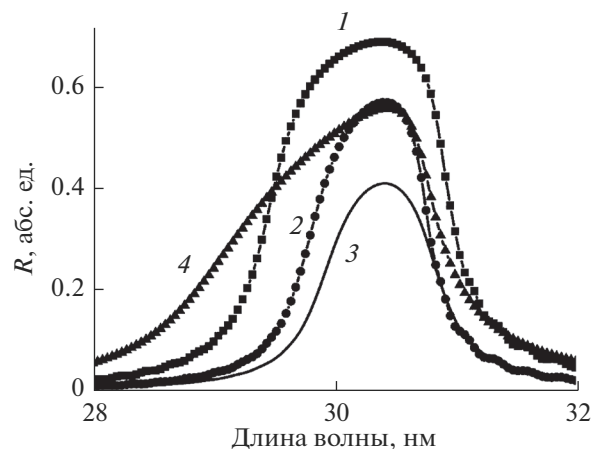


Рис. 8. Теоретические спектральные зависимости коэффициентов отражения многослойных зеркал Be/Mg (1), Si/Mg (2), SiC/Mg (3), Be/Al (4) в окрестности длины волны 30.4 нм при нормальном падении излучения (для идеальных структур).

Таблица 4. Теоретические значения отражательных характеристик идеальных зеркал на длине волны 30.4 нм

Структура	$\Delta\lambda$, нм	R , %
Be/Mg	1.52	68.5
Be/Al	1.00	41.0
Si/Mg	1.04	57.0
SiC/Mg	1.84	55.7

на 2%. Для этой же структуры снимали спектральную зависимость $R(\lambda)$ при угле падения излучения 2° относительно нормали. Результаты измерений приведены на рис. 10. Синтезированная структура Be/Si/Al показала на длине волны 31.3 нм следующие, практически неизменные во времени, отражательные характеристики: $R = 34.3\%$, $\Delta\lambda_{1/2} = 1$ нм. Таким образом, предлагаемые в работе многослойные зеркала Be/Si/Al превосходят магниевые зеркала как по пиковому коэффициенту отражения, так и по спектральной селективности и временной стабильности.

В случае магниевых-бериллиевых зеркал изучали как простые двухкомпонентные зеркала Mg/Be, так и структуры с защитной тонкой пленкой алюминия, осажденной сверху, Mg/Be + Alcap. После синтеза зеркала помещали на хранение в разных условиях. Половина образцов хранилась в комнатных условиях, другая половина находилась в форвакууме (давление остаточной атмосферы ~ 100 Па). На рис. 11 приведены данные о временной зависимости коэффициентов отражения для этих образцов. Без защитного покрытия наблюдается сильная деградация коэффициента отражения многослойного зеркала Be/Mg. За девять месяцев он упал с 49 до 30%. Исходя из того, что образец, помещенный в вакуум, продемонстри-

ровал высокую стабильность, можно сделать вывод, что ключевым фактором, приводящим к деградации коэффициента отражения, является окисление.

На рис. 12 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения образца многослойного зеркала Mg/Be + Alcap, хранившегося в атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия). Угол падения излучения 2° относительно нормали. Кривые были сняты спустя девять месяцев после напыления. При абсолютной временной стабильности структура обладает рекордно высоким коэффициентом отражения $R = 56\%$ при умеренной полосе пропускания $\Delta\lambda_{1/2} = 1.6$ нм ($\lambda/\Delta\lambda \approx 20$).

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В качестве базовой предпосылки успешности применения бериллия как основы многослойных зеркал МР-диапазона следует указать его уникальные оптические свойства. На рис. 13 представлены дисперсионные зависимости действительной и мнимой добавок к показателю преломления ($n = 1 - \delta + i\gamma$) бериллия и наиболее часто употребляемых слабо поглощающих материалов в спектральной области 0.5–6 нм. Из приведенных данных видно, что бериллий в рассматриваемом диапазоне обладает наименьшим поглощением (зависимость γ), что делает его привлекательным для применения в качестве слабо поглощающего материала. В диапазоне длин волн больше 3 нм наиболее прозрачным материалом становится скандий. Бериллий же сохраняет свою относительную прозрачность, что важно

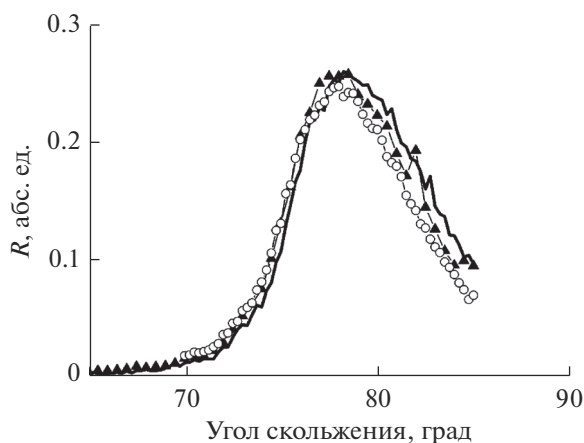


Рис. 9. Угловые зависимости коэффициента отражения зеркала Be/Si/Al, снятые на длине волны 30.4 нм сразу после напыления (сплошная кривая), через восемь (треугольники) и через 20 мес. (кружки).

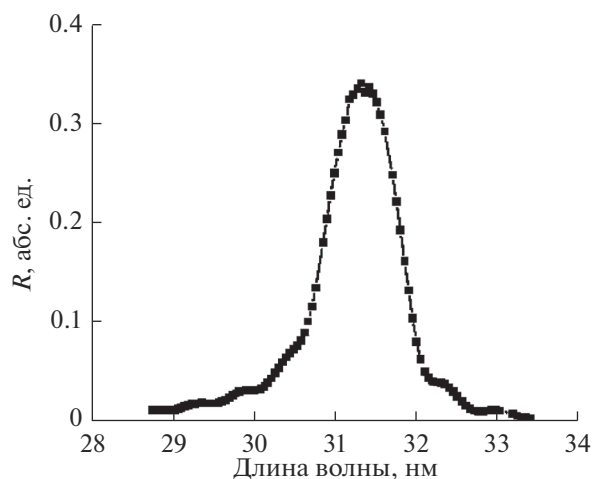


Рис. 10. Спектральная зависимость коэффициента отражения зеркала Be/Si/Al, снятая при угле падения излучения 2° относительно нормали.

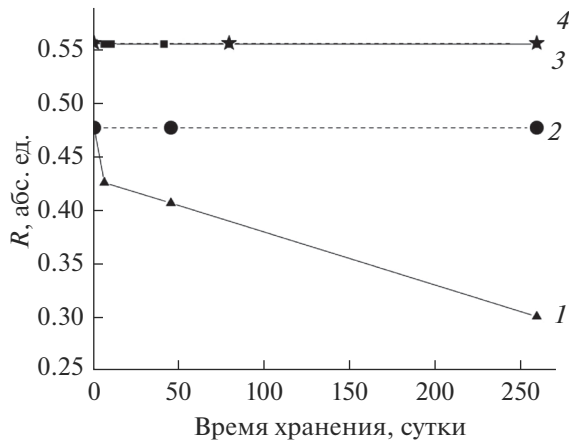


Рис. 11. Сравнение временных зависимостей коэффициентов отражения многослойных зеркал Mg/Be (1, 2) и Mg/Be + Alcar (3, 4), хранящихся как в комнатных условиях (1, 3), так и при давлении 100 Па (2, 4).

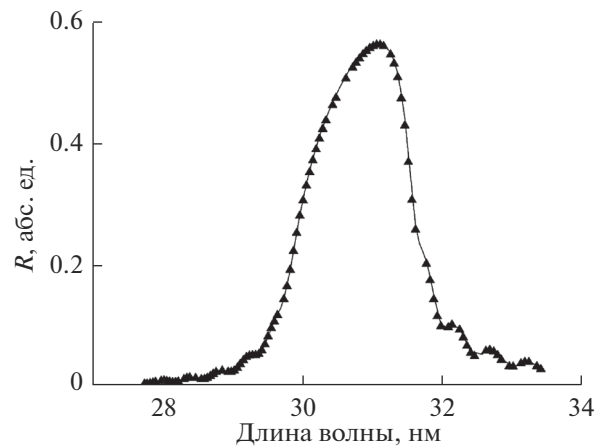


Рис. 12. Спектральные зависимости коэффициентов отражения образца многослойного зеркала Mg/Be + Alcar, хранившегося в атмосфере (точки) и в вакууме (сплошная линия).

для его использования в качестве рассеивающего, слабо поглощающего материала.

В работе приводятся результаты исследований впервые изготовленных многослойных зеркал W/Be для модернизированной версии двухзеркального монохроматора, установленного на синхротроне ВЭПП-5 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера [29]. Зеркала предназначены для работы в диапазоне 0.67–3.14 нм. Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения, снятые на длинах волн 0.154, 0.989, 1.759 и 3.14 нм, приведены на рис. 14. Сплошные линии – подгонка, символы и изрезанная кривая – измеренные значения. Как видно из рисунка, экспериментальные кривые, за исключением длины волны 3.14 нм,

хорошо описываются расчетными кривыми при следующих структурных параметрах многослойных зеркал: количество периодов $N = 200$; период $d = 2.278$ нм; средние по структуре толщины вольфрама $d_W = 0.951$ нм и бериллия $d_{Be} = 1.327$ нм; плотность W 18 г/см³, плотность Be – табличная; толщина переходных слоев Be-на-W 0.4 нм и W-на-Be 0.21 нм. Следует отметить, что последовательность границ с использованием метода рефлектометрии однозначно не определяется. Соответственно, наилучшей границей может быть и Be-на-W. Как правило, эта проблема решается применением дополнительного метода электронной микроскопии поперечных срезов. Неудовлетворительное совпадение на длине волны 3.14 нм объясняется низкими интенсивностями зондово-

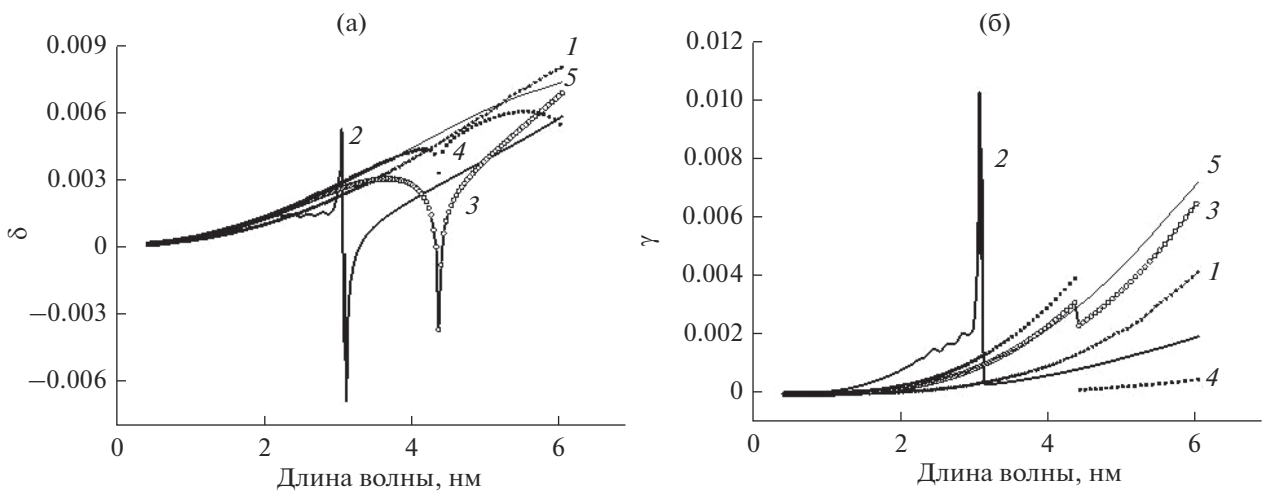


Рис. 13. Спектральные зависимости в диапазоне 0.5–6 нм действительной (а) и мнимой (б) добавок к показателям преломления ($n = 1 - \delta + i\gamma$) слабо поглощающих материалов: Be (1); Sc (2); C (3); B₄C (4); Si (5).

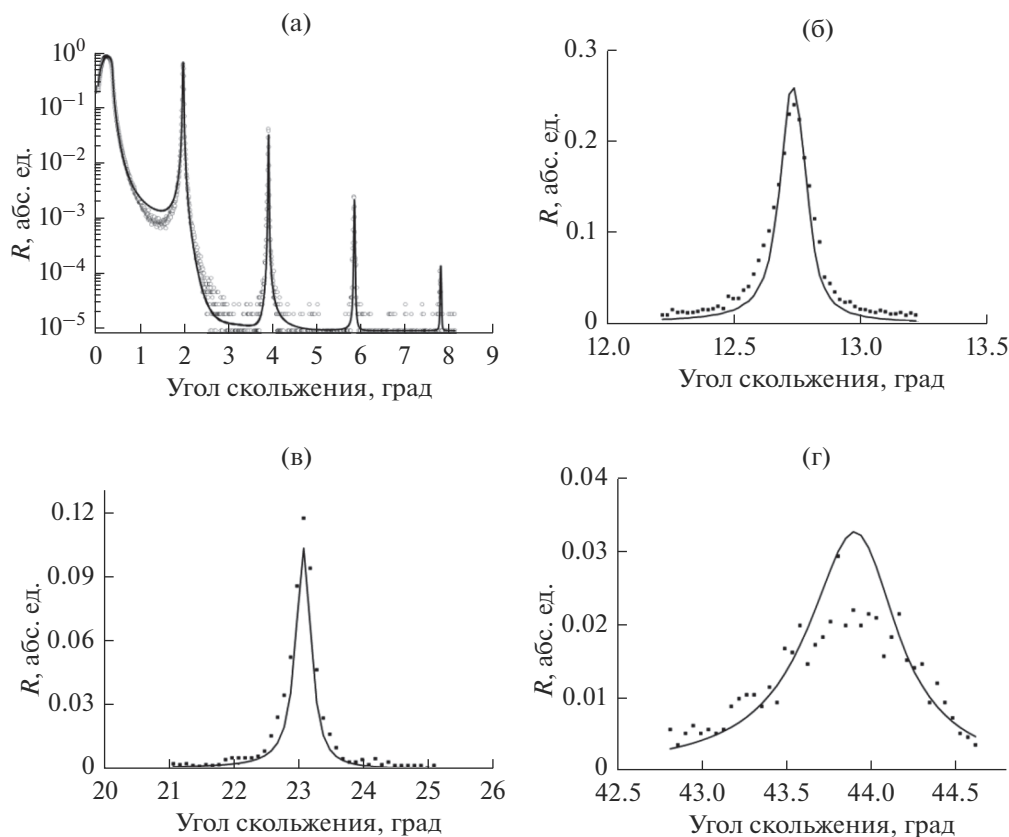


Рис. 14. Измеренные (точки) и полученные в результате подгонки (сплошные линии) угловые зависимости коэффициентов отражения многослойного зеркала W/Be, длина волны: а – 0.154; б – 0.989; в – 1.759; г – 3.14 нм.

го пучка и значениями коэффициента отражения многослойных рентгеновских зеркал. Ситуация усугубилась близостью угла падения к углу Брюстера, что автоматически уменьшило в два раза коэффициент отражения неполяризованного излучения.

Таким образом, впервые для широкой спектральной области 0.67–3.14 нм были применены многослойные зеркала 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 зеркал этого типа не симметричная. Наилучший фитинг достигается при размерах переходных областей: Be-на-W 0.4 нм и W-на-Be 0.21 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения возможностей создания оптических схем литографов с рабочими длинами волн 11.2 и 13.5 нм синтезированы структуры на основе Mo/Be. Измерения отражательных характеристик проводили на синхротроне BESSY-II в диапазонах длин волн 11.2–11.4 и 12.7–13.9 нм. Пико-

вое значение коэффициента отражения зеркала Mo/Be при $\lambda = 11.4$ нм достигает 70.25% (теоретический предел порядка 74%). Основными причинами несоответствия теории и эксперимента являются протяженные межслоевые границы: Mo-на-Be 0.71 нм и Be-на-Mo 0.36 нм. Имеются предварительные экспериментальные данные, указывающие на возможность увеличения этого коэффициента, по крайней мере, на 2–2.5%. С целью уменьшения межслоевой шероховатости применена методика барьерных слоев. Важнейшим наблюдением, сделанным в ходе этих экспериментов, стало обнаружение сглаживающего эффекта применения тонкой пленки кремния. Именно для структуры Mo/Be/Si (указан порядок материалов в направлении от подложки к верхнему слою) протяженность межслоевой границы Be-на-Mo снижается до 0.33 нм. Этот эффект использован для повышения отражательной способности зеркал, оптимизированных на длину волны 13.5 нм. Отражение от многослойного зеркала типа Mo/Be/Si приближается к 72% на длине волны 13.5 нм и к 73% на длине волны 12.9 нм (до сих пор лучшим отражением – 70% – на 13.5 нм обладали структуры Mo/Si).

Проведены исследования отражательных характеристик узкополосных зеркал для солнечной астрономии, оптимизированных на длину волны 13.2 нм. При практически одинаковых ширинах спектральной полосы пропускания (0.35 нм) коэффициенты отражения изучаемых образцов больше, чем у традиционных зеркал Mo/Si: $R(\text{Mo/Si}) = 54\%$ и $R(\text{Mo/Be}) = 58\%$. На практике при разработке оптических систем зачастую на основе двухзеркальных схем отличие в отражательной способности может достигать десятков процентов, по этой причине авторы рассматривают пару Mo/Be как наиболее перспективную для разработки оптики в спектральной области около 13 нм.

Показано, что в диапазоне длин волн 17–30 нм в многослойных структурах Be можно использовать не в качестве слабо поглощающего, а в качестве рассеивающего материала. Благодаря малому поглощению можно ожидать уникальное сочетание отражательных характеристик: одновременно рекордно высоких пиковых коэффициентов отражения и спектральной селективности. Этот вывод подтвержден экспериментально на длинах волн 17 и 30.4 нм на примере Be/Al и Be/Mg. В ходе экспериментов изучали отражательные характеристики многослойных зеркал Be/Al и Be/Si/Al, оптимизированных на спектральный диапазон вблизи 17.1 нм. Обнаружено, что кремний оказывает аморфизирующее воздействие, снижая межслоевую шероховатость с 1.3 до 0.6 нм. Пиковое значение коэффициента отражения структур Be/Si/Al достигает 61% при спектральной ширине кривой около 0.4 нм. Экспериментально показано, что структуры типа Zr/Be/Si/Al, оптимизированные на 17.1 нм, обладают еще большим пиковым коэффициентом отражения — 67% (до сих пор лучшим отражением 56% обладали структуры Al/Zr). На основе того же состава — Al/Be/Si — удалось создать обладающие стабильными во времени отражательными характеристиками многослойные зеркала для работы на длине волны 30.4 нм. Они превосходят традиционные зеркала, базирующиеся на паре Si/Mg, не только по стабильности, но и по коэффициенту отражения (34% против 30%), а также по спектральной полосе пропускания (1 нм против 1.2 нм). Изучены структуры типа Be/Mg. Если максимум коэффициента отражения Al/Be/Si составляет 34% при полосе пропускания 1 нм, то для Be/Mg это 56% и 1.6 нм соответственно. Таким образом, первая структура демонстрирует рекордную спектральную селективность, вторая — максимум коэффициента отражения. Дальнейшие исследования проводили с целью определения временной стабильности отражательных характеристик зеркал при их хранении в комнатных условиях. Показано, что для многослойных зеркал Al/Be/Si и Mg/Be + Alcap в течение длительного времени

(порядка года) не наблюдается никаких изменений.

Впервые изучены структуры типа W/Be, предназначенные для работы в МР-диапазоне. Полученные значения межслоевой шероховатости Be-на-W 0.45 нм и W-на-Be 0.22 нм. Плотность слоя вольфрама толщиной 1 нм составляет приблизительно 0.95 от табличного значения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” ИФМ РАН при поддержке РФФИ (гранты № 17-52-150006, № 18-02-00588, № 18-32-00671), а также в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0204) при поддержке Президиума РАН (Программы I.1 “Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом” и I.2 ‘Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий’), в части измерений на BESSY-II поддержка оказана РФФИ–DFG (гранты № 16-42-01034 и № SO 1497/1-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахсаханян А.Д., Ключенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 1. С. 5.
2. Montcalm C., Kearney P.A., Slaughter J.M. et al. // Appl. Opt. 1996. V. 35. № 25. P. 5134.
3. Windt D.L., Donguy S., Steely J. et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5168. P. 1.
4. Skulina K.M., Alford C.S., Bionta R.M. et al. // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 19. P. 3727.
5. Mirkarimi P.B. // Opt. Eng. 1999. V. 38. № 7. P. 1246.
6. Montcalm C., Bajt S., Mirkarimi P.B. et al. // Proc. SPIE. 1999. V. 3331. P. 42.
7. Singh M., Braat J.M. // Appl. Opt. 2000. V. 39. № 13. P. 2189.
8. Bajt S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. № 2. P. 557.
9. Chkhalo N.I., Pariev D.E., Polkovnikov V.N. et al. // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 106.
10. Svechnikov M., Pariev D., Nechay A. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2017. V. 50. P. 1428.
11. Bibishkin M.S., Chekhonadskikh D.P., Chkhalo N.I. et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5401. P. 8.
12. Schäfers F., Bischoff P., Eggenstein F. et al. // J. Synchr. Rad. 2016. V. 23. P. 67.
13. Langford R.M., Petford-Long A.K. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19. P. 2186.
14. Andreev S.S., Gaponova S.V., Gusev S.A. et al. // Thin Solid Films. 2002. V. 415. P. 123.
15. Yulin S., Feigl T., Kuhlmann T. et al. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. № 3. P. 1216.
16. Bajt S., Alameda J., Barbee T. et al. // Opt. Eng. 2002. V. 41. № 8. P. 1797.
17. Braun S., Mai H., Moss M. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 4074.

18. *Yakshin A.E., van de Kruijs R.W.E., Nedelcu I. et al.* // Proc. SPIE. 2007. V. 6517. P. 651701.
19. *Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N. et al.* // Opt. Lett. 2017. V. 42. Iss. 24. P. 5070.
20. *Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V. et al.* // Appl. Optics. 2016. V. 55. № 9. P. 2126.
21. *Nechay A.N., Chkhalo N.I., Drozdov M.N. et al.* // AIP Adv. 2018. V. 8. P. 075202.
22. *Кузин С.В., Богачев С.А., Перцов А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 91.
23. *Soufli R., Windt D.L., Robinson J.C. et al.* // Proc. SPIE. 2005. V. 5901. P. 590101-M.
24. *Meltchakov E., Ziani A., Auchere F. et al.* // Proc. SPIE. 2011. V. 8168. P. 816819-1.
25. *Ни М.Н., Le Guen K., André J.M. et al.* // Opt. Exp. 2010. V. 18. P. 20019.
26. *Салащенко Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1999. № 1. С. 50.
27. *Кузин С.В., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 88.
28. *Zuppella P., Corso A.J., Nicolosi P. et al.* // Proc. SPIE. 2011. V. 8076. P. 807608-1.
29. *Гаврилов Н.Г., Легкодымов А.А., Николенко А.Д., Пиндюрин В.Ф., Чернов В.А., Субботин А.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2000. № 1. С. 129.

Multilayer Mirrors Based on Beryllium For Soft X-Ray and Extreme Ultraviolet Range

**Yu. A. Vainer¹, S. A. Garakhin¹, S. Yu. Zuev¹, A. N. Nechay¹, R. S. Pleshkov¹,
V. N. Polkovnikov¹, *, N. N. Salashchenko¹, M. V. Svechnikov¹, M. G. Sertsu², R. M. Smertin¹,
A. Sokolov², N. I. Chkhalo¹, F. Schäfers²**

¹*Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

²*Helmholtz-Zentrum Berlin, Albert-Einstein-Straße 15, Berlin, D-12489 Germany*

**e-mail: polkovnikov@ipmras.ru*

A review of recent experimental results obtained in the study of beryllium-containing multilayer mirrors is given. Mirrors are of interest for projection nanolithography, solar astronomy, X-ray microscopy and other applications. For a number of bands, beryllium-containing multilayer mirrors are shown to be superior in their X-ray optic characteristics with respect to those available in the world.

Keywords: X-rays, multilayer mirrors, magnetron sputtering.