

Состояние дел в области разработки и изготовления многослойных зеркал нормального падения для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов

© В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: polkovnikov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 11 июня 2026 г.

В окончательной редакции 11 июня 2026 г.

Принято к публикации 11 июня 2026 г.

Представлены результаты исследований, связанных с многослойными отражающими покрытиями рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн. Основной упор сделан на последние опубликованные экспериментальные данные. Приведены лучшие достигнутые на данный момент значения коэффициентов отражения для многослойных рентгеновских зеркал в диапазоне длин волн 2–30 nm. Большое внимание уделяется применяемым в ИФМ РАН методам синтеза зеркал, а также исследованиям их свойств. Обсуждаются основные проблемы, возникающие при создании и исследовании свойств многослойных рентгеновских зеркал, и способы их решения. Показано, какие методы приводят к улучшению отражательных характеристик зеркал.

Ключевые слова: тонкие пленки, многослойные зеркала, рентгеновское излучение, коэффициент отражения, шероховатость.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63612.196-26

Введение

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) вызывают значительный интерес благодаря их широкому применению в качестве дисперсионных элементов. Они востребованы в рентгеновской спектроскопии, микроскопии, литографии, элементном флуоресцентном анализе, диагностике высокотемпературной плазмы и ряде других областей. Особое внимание привлекает многослойная оптика нормального падения, которая обеспечивает нанометровое пространственное разрешение и активно используется, например, для исследования солнечной короны, а также в задачах микроскопии и литографии.

В наиболее простом варианте МРЗ формируются путем нанесения на сверхгладкую подложку периодической структуры, состоящей из чередующихся слоев двух материалов с разными значениями диэлектрической проницаемости. Принцип действия МРЗ основан на интерференции волн, отраженных от границ между слоями. Условие конструктивной интерференции, при котором волны складываются в фазе, аналогично закону Вульфа-Брэгга для кристаллов:

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta \approx n \cdot \lambda, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad (1)$$

где d — период структуры, θ — угол скольжения излучения (отсчитывается от плоскости зеркала), λ — длина волны излучения.

Согласно формуле (1), для зеркал, работающих при нормальном падении ($\theta = 90^\circ$) и в первом порядке

отражения ($n = 1$), период многослойной структуры примерно равен половине длины волны ($\lambda/2$). При этом физического ограничения сверху толщин отдельных слоев нет, а минимально возможная толщина определяется технологией осаждения: сплошной слой не может быть тоньше определенного порога, который для большинства материалов составляет около 0.4–0.5 nm. В результате для двухкомпонентной структуры минимальная толщина периода составляет примерно 0.8–1 nm, что соответствует минимальной рабочей длине волны 1.6–2 nm.

МРЗ характеризуется, прежде всего, коэффициентом отражения и его зависимостью от длины волны или угла падения излучения. При этом основными характеристиками являются пиковый (максимальный) R_m и интегральный R_{in} коэффициенты отражения, спектральная селективность $\lambda/\Delta\lambda$, где λ соответствует положению максимума отражения, а $\Delta\lambda$ — спектральной ширине кривой отражения на половине высоты. Коэффициенты отражения тем больше, чем больше скачок показателя преломления на границах раздела между материалами и меньше поглощение в слоях, т.е. условие максимизации скачка показателя преломления в первых структурах Au/C [1] и W/C [2] является недостаточным и их заменили структурами Ni/C [3] и Co/C [4], обладающими меньшим поглощением. В данном случае уменьшение поглощения привело к большему положительному эффекту, чем потеря отражения вследствие уменьшения скачка показателя преломления.

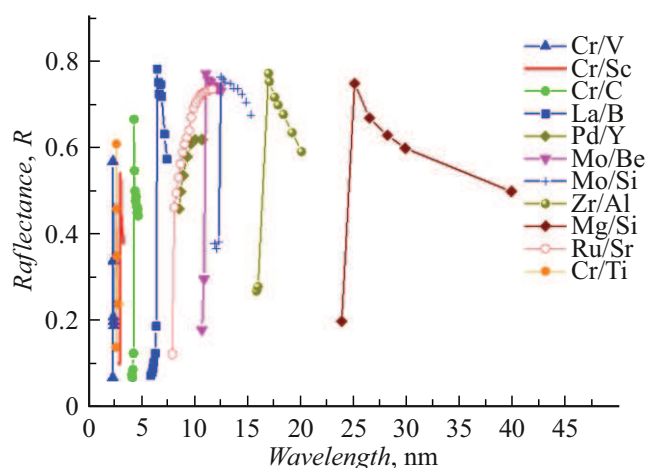


Рис. 1. Теоретические зависимости коэффициентов отражения для идеальных МРЗ ряда пар элементов.

На практике подбор материалов для МРЗ обычно проводят по определенной схеме. В первую очередь выбирают слабопоглощающий элемент, который должен обладать минимальным поглощением на рабочей длине волны зеркала — это обеспечивает максимальный коэффициент отражения. Как правило, такими свойствами обладают вещества, у которых ближайший край поглощения находится левее (в сторону меньших длин волн) от рабочей длины волны и максимально к ней приближен.

Выбор сильнопоглощающего элемента менее однозначен: для него важно сочетание относительно низкого поглощения и высокого оптического контраста по отношению к слабопоглощающему материалу. Таких кандидатов может быть несколько. Кроме того, в процессе синтеза МРЗ существенную роль играют химические и технологические свойства материалов, поэтому окончательный выбор сильнопоглощающего компонента обычно осуществляется экспериментально.

Спектральная селективность определяется глубиной экстинкции излучения в МРЗ и оценивается как $\lambda/\Delta\lambda \approx N_{\text{eff}}$. N_{eff} соответствует числу периодов МРЗ, участвующих в формировании отраженной волны. Для оценки основных отражательных характеристик МРЗ в окрестности брэгговского пика можно пользоваться формулами, полученными в пионерской работе [5].

В настоящей работе мы будем придерживаться правила записи МРЗ типа А/В, где А будет обозначать сильнопоглощающий элемент, В — слабопоглощающий элемент.

Наличие краев поглощения фактически определяет области эффективности МРЗ на базе того или иного слабопоглощающего элемента. На рис. 1 представлены теоретические зависимости коэффициентов отражения для идеальных МРЗ в диапазоне длин волн 2–30 nm.

В приведенной зависимости можно видеть, что спектральная область разделяется на диапазоны согласно оптимальным слабопоглощающим элементам. В табл. 1 представлены эти диапазоны и перечислены слабопоглощающие элементы.

В настоящей работе будут представлены результаты только для МРЗ нормального падения.

1. Методика синтеза МРЗ

Как правило, МРЗ изготавливаются методом магнетронного напыления. В ИФМ РАН имеется комплекс из 7 технологических установок. Установки оснащены двумя, четырьмя и шестью магнетронами. Это позволяет формировать в одном технологическом цикле многослойные структуры, включающие от двух до шести материалов, что существенно расширяет возможности по напылению сложносоставных многослойных структур.

На рис. 2 приведена схема магнетронной установки с шестью магнетронными источниками.

Установка магнетронного напыления представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру высотой 0.4 m и диаметром 1 m. Внутри по окружности расположены шесть магнетронов планарного типа диаметром 150 mm каждый. На поверхности магнетронов через токопроводящий слой устанавливаются мишени из распыляемых материалов (диаметр 150–160 mm, толщины до 8–10 mm), служащие катодом. Наиболее распространенные материалы мишеней: W, Mo, Ru, Pt, Ni, Co, Cr, Sc, Y, Al, Mg, Be, Zr, Ti, Si, C, B₄C и др. Напряжение на мишени обычно составляет 150–500 V. Охлаждение магнетронов производится за счет принудительной подачи воды с помощью помпы.

Индукция магнитного поля на поверхности мишени составляет $4 - 7 \cdot 10^{-2}$ T (в зависимости от толщины мишени, которая может достигать 10 mm). Величина напряжения в темном катодном пространстве определяет энергию частиц, попадающих на подложку. Типичные значения напряжения в наших установках 250–300 V при давлениях рабочего газа (аргона чистоты 99.998 %) в вакуумном объеме $2 - 3 \cdot 10^{-2}$ P. При этом характерные значения скорости роста пленок составляют

Таблица 1. Слабопоглощающие элементы и спектральные диапазоны их оптимального применения

Диапазон длин волн, nm	2.42–2.73	2.73–3.12	3.12–4.47	4.47–6.63	6.63–9	9–11.1	11.1–13.5	13.5–17.1	17.1–25	> 25
Слабопоглощающие элементы	V	Ti	Sc	C	B	Y, Sr	Be	Si	Al	Mg

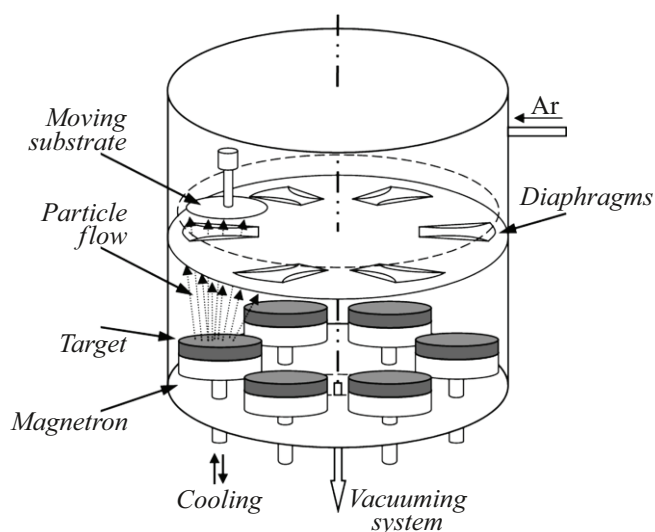


Рис. 2. Схема установки магнетронного напыления.

порядка 0.1–1 nm/s (существенным образом зависит от материала мишени).

Подложка крепится на вращающемся диске, попеременно проходящем над магнетронами. Таким образом, осуществляется послойное нанесение материалов. Расстояние от мишени до подложки составляет примерно 75 mm. В дополнение к вращению диска подложка вращается вокруг своей оси с высокой угловой скоростью (до десяти оборотов в секунду). Это обеспечивает равномерность покрытия по углу.

Для обеспечения равномерности толщины пленок на требуемом уровне, либо заданного распределения периода МРЗ по радиусу подложки над каждым магнетроном расположены фигурные диафрагмы. Изменяя их форму, можно контролировать распределение плотности потока вещества, поступающего на подложку. Точность управления распределением периода по площади зеркала составляет величину до 0.2 % от величины периода.

Перед началом процесса над рабочими магнетронами зажигается тлеющий разряд, ионы которого устремляются к мишени с отрицательным потенциалом, разгоняются и выбивают атомы вещества. Большая часть распыляемого вещества устремляется вверх в направлении подложки. Количество одновременно работающих магнетронов определяется задачей — по количеству материалов в составе зеркала (от одного до шести для этого вида установки).

В ходе процесса магнетроны работают непрерывно. Подложка проходит над ними с различной скоростью — в зависимости от необходимой толщины слоя. Характерное время нахождения подложки в разряде одного магнетрона 10–20 s. Полный оборот подложки около 1 min. Если в зеркале, скажем, 60 периодов — мы имеем порядка часа работы, если около 600 периодов — порядка десяти часов работы.

Высокие требования к периодичности напыляемых зеркал накладывают жесткие условия на стабильность таких параметров технологического процесса, как давление рабочего газа в камере, электрическая мощность на магнетронах, скорость прохождения подложки над магнетронами. Флуктуации или дрейф значений этих параметров отражаются на толщинах растущих слоев.

Решение задачи стабилизации параметров технологического процесса достигается путем использования программно-аппаратного комплекса на базе РС-совместимого промышленного контроллера i-8431. Контроль и протоколирование параметров процесса напыления осуществляется с помощью персонального компьютера.

В подавляющем большинстве случаев результаты измерений коэффициента отражения синтезированных МРЗ не совпадают с расчетными характеристиками. С точки зрения формирования высокоотражающих многослойных покрытий крайне важным фактором является качество межслойных границ раздела. В это понятие входит как поверхностная шероховатость индивидуальных пленок, составляющих МРЗ, так и взаимное перемешивание материалов или формирование химических соединений на границах раздела.

Для уменьшения величины переходных областей применяется широко развитые методики интерфейсинжиниринга. Одним из таких методов является синтез структур в смеси газов аргон + азот [6–8]. Несмотря на тот факт, что азот увеличивает поглощение в структуре, правильный выбор доли азота в смеси газов позволяет увеличить коэффициент отражения зеркала за счет снижения толщины переходной области на границах.

Другой развитой методикой интерфейсинжиниринга является добавление барьерных слоев в структуру. В [9–11] показано, что добавление карбида бора на более протяженную границу приводило к уменьшению толщины переходной области, а, следовательно, к увеличению коэффициента отражения.

2. Методики измерения характеристик МРЗ

Решение задач синтеза МРЗ с определенными характеристиками невозможно без соответствующих методик диагностики структур. В ИФМ РАН существует комплекс оборудования для измерения и исследования МРЗ. К нему относятся рефлектометры, способные снимать как угловые, так и спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал, дифрактометры, атомно-силовые и электронные микроскопы, а также вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС). Для целей диагностики также используются методики рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и комбинационного рассеяния света (КРС). По результатам измерений, полученных различными методами, можно достаточно точно восстановить основные параметры МРЗ.

Одним из наиболее важных и востребованных неразрушающих методов изучения внутренней структуры многослойных зеркал является метод рефлектометрии в области жесткого рентгеновского излучения (ЖР). У данного метода есть свои очевидные преимущества. Малая длина волны излучения (линия $\text{CuK}\alpha_1$, $\lambda = 0.154 \text{ nm}$), сравнимая с межатомными расстояниями, обуславливает чувствительность этого метода к атомному строению материала. Низкое поглощение и рассеяние этого излучения в воздухе позволяет проводить измерения вне вакуума. Это последнее обстоятельство значительно уменьшает стоимость оборудования и время проведения эксперимента. В ИФМ РАН изучение МРЗ в ЖР области производится с помощью рентгеновских дифрактометров типа Philips X'Pert PRO (Philips Analytical, Нидерланды) и Bruker D8 Discover (Bruker Corporation, США).

Основной задачей рефлектометрии в мягкой рентгеновской (МР) и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) областях спектра является исследование отражательных характеристик оптических элементов на рабочих длинах волн. В ИФМ РАН имеется несколько рефлектометров, предназначенных для аттестации оптических элементов в МР и ВУФ диапазонах длин волн. Это рефлектометры с монохроматорами РСМ-500 (позволяет измерять на характеристических линиях в диапазоне $0.6\text{--}25 \text{ nm}$) и ЛНТ-30 (на характеристических линиях в диапазоне $30\text{--}200 \text{ nm}$) [12], а также с монохроматором на основе схемы Черни-Тюрнера (измерения в непрерывном спектре в диапазоне $5\text{--}70 \text{ nm}$) [13].

Измерения и последующая обработка результатов измерений в ЖР, МР и ВУФ областях спектра позволяют определить большинство параметров МРЗ (период, соотношение толщин материалов в периоде, межслоевую шероховатость и др.). Метод основан на одновременной подгонке кривых отражения, снятых для одного МРЗ на различных длинах волн [14,15].

Также применяются дополнительные методы — просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС). Как правило, для получения ПЭМ изображений из образцов с помощью сфокусированного ионного пучка Ga^+ с высокой (порядка 30 meV) энергией вырезаются ламели. В дальнейшем для утончения получившихся срезов применяется дополнительное травление низкоэнергетическим пучком Ar^+ с более низкой энергией (порядка 300 V). ПЭМ изображения напрямую способны показать слои в МРЗ, а также области перемешивания слоев различных материалов. Измерения ПЭМ проводились с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения LIBRA 200 MC.

Послойный элементный анализ ВИМС в ИФМ РАН проводится на установке TOFSIMS-5 фирмы IONTOF (Германия) с время-пролетным масс-анализатором. Метод основан на последовательном чередовании двух

режимов работы прибора: распыляющего и анализирующего. Вначале поверхность образца обрабатывается низкоэнергетическим ионным пучком, который удаляет материал, формируя кратер. Затем включается высокоэнергетический анализирующий пучок, который выбивает из этого кратера вторичные ионы. Эти ионы регистрируются с помощью время-пролетного масс-анализатора, что позволяет определить состав. После этого цикл повторяется: снова происходит распыление, за ним — анализ, что обеспечивает послойное исследование материала. Поскольку скорость распыления постоянна, по времени проведения эксперимента можно точно рассчитать глубину анализа. Для многослойных структур задача упрощается: их периодичность служит естественным масштабом, по которому удобно определять глубину анализа. Методика описана в [16].

Измерение спектров КРС проводится на спектрометре T64000 Horiba Jobin Yvon, соединенном с микроскопической приставкой. Подробнее о схеме и проведении экспериментов можно найти в [17]. Эта методика дает сведения о внутренней структуре слоев тонких пленок, о механических напряжениях в них, о кристаллических фазах.

Измерения спектров РФЭС проводятся на фотоэлектронном спектрометре Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi [18], лабораторном модуле ESCA экспериментальной станции НАНОФЭС синхротрона „КИСИ-Курчатов“ [19]. Этот метод чувствителен к химическому составу межслоевых границ раздела.

3. МРЗ на основе V

Область аномальной дисперсии К-края поглощения ванадия (вблизи $\lambda = 2.42 \text{ nm}$) лежит в спектральной области „окна прозрачности воды“, которая ограничена К-краями поглощения кислорода ($\lambda = 2.26 \text{ nm}$) и углерода ($\lambda = 4.38 \text{ nm}$). Оптимальным сильнопоглощающим материалом по отношению к слабопоглощающему ванадию вблизи $\lambda = 2.42 \text{ nm}$ является хром.

МРЗ на основе пары материалов Cr/V были подробно исследованы в работах [20–22]. В [20] сообщается о достижении коэффициента отражения 9 % для зеркала Cr/V на длине волны 2.42 nm . Согласно [21], введение барьерных слоев В–С между слоями Cr и V позволяет существенно снизить межслоевую шероховатость до значений $0.21\text{--}0.31 \text{ nm}$, что положительно сказывается на оптических характеристиках. В настоящей работе для подобного зеркала зафиксировано отражение 24.3 % на длине волны 2.44 nm при угле падения излучения 42° (от нормали). Однако данное значение не следует рассматривать как характеристическое для зеркал нормального падения, поскольку у них период структуры значительно меньше, а влияние шероховатости на эффективность отражения проявляется гораздо сильнее.

Таблица 2. Структурные параметры синтезированных образцов

Структурный состав	dC , Å	S_{Cr} , Å	S_V , Å
sub/Cr/V	—	4.1	4.1
sub/Cr/C/V	0.6	2.5	4.1
sub/Cr/C/V	1.2	2.5	4.1
sub/Cr/C/V	2.0	2.4	4.1
sub/Cr/V/C	0.6	4.1	2.0
sub/Cr/V/C	1.2	4.1	3.0
sub/Cr/V/C	2.0	4.0	2.0
sub/Cr/C/V/C	0.6	3.3	2.0

Примечание: Название образца, структурный состав (sub означает подложка, порядок материалов обозначен от подложки), dC — толщина слоев углерода в Å, S_{Cr} — ширина переходной области V-на-Cr в Å, S_V — ширина переходной области Cr-на-V в Å. Число периодов для всех структур составляло $N = 50$.

Перспективным материалом для использования его в качестве барьерных слоев также является карбид бора [22]. В данной работе приводится результат исследования влияния барьерных слоев углерода на структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ на основе пары материалов Cr/V. Также проводится изучение оптимального соотношения толщин материалов в периоде структуры с целью получения максимального коэффициента отражения.

В рамках экспериментальных исследований, проведенных в ИФМ РАН, были изучены толщины переходных областей в МРЗ Cr/V. Для этого был изготовлен ряд структур с периодом $d = 1.8$ nm и числом периодов $N = 50$. В серию образцов вошли как зеркала без барьерных слоев, так и структуры с прослойками углерода различной толщины на одной или обеих границах раздела, а также образец с барьерными слоями, нанесенными на обе границы. Результаты измерений для всех синтезированных структур приведены в табл. 2.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать ряд выводов.

Во-первых, в МРЗ Cr/V без углеродных барьерных слоев ширина переходных областей оказывается значительной для выбранного периода, что подчеркивает важность применения методов интерфейс-инжиниринга для повышения качества границ раздела.

Во-вторых, параметры переходных областей демонстрируют симметрию для обеих границ раздела.

В-третьих, даже при введении тонких углеродных барьеров (условной толщиной 0.6 Å) наблюдается заметное уменьшение ширины интерфейсов. В-четвертых, нанесение углеродных барьерных слоев на каждую из границ положительно сказывается на структурных

характеристиках зеркала, что делает целесообразным синтез структур типа sub/Cr/C/V/C.

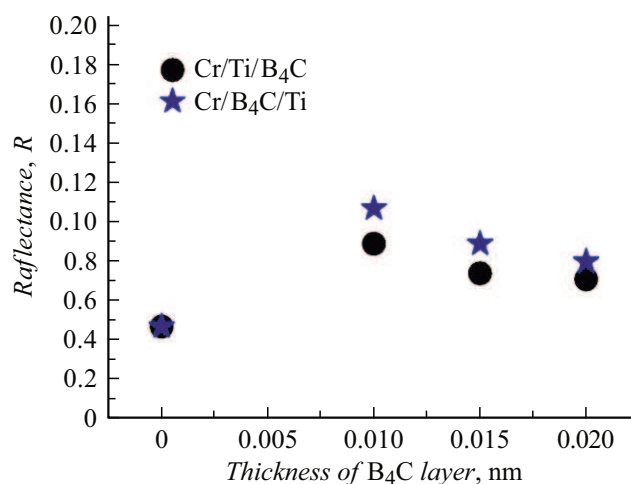
4. МРЗ на основе Ti

В области аномальной дисперсии оптических констант титана ($\lambda = 2.74$ nm) для зеркал нормального падения обычно применяют сочетание пары материалов Cr/Ti. Согласно данным работ [23,24], максимальный коэффициент отражения для таких зеркал на этой длине волны составил 2.1 % при 100 периодах с толщиной $d = 1.379$ nm и соотношением толщин слоев 0.5. В работе [20] сообщается о более высоком отражении (17 %) для Cr/Ti-зеркал, однако из-за отсутствия сведений о длине волны и угле падения эти результаты сложно воспроизвести.

В наших исследованиях мы применили к МРЗ Cr/Ti методику интерфейс-инжиниринга, внедрив барьерные слои В₄С [25]. Исходные образцы, полученные методом магнетронного напыления, демонстрировали отражение на уровне 5 % при угле падения 5° на длине волны 2.74 nm. Снижение отражения по сравнению с теоретическим пределом объясняется перемешиванием материалов на границах раздела, что приводит к отклонению плотностей слоев от табличных значений и уменьшению оптического контраста.

Введение тонких (порядка 1 Å) буферных слоев В₄С на любую из границ раздела позволило повысить отражательную способность за счет уменьшения перемешивания и приближения плотностей слоев к эталонным. На рис. 3 представлены значения пиковых коэффициентов отражения для Cr/Ti-зеркал с барьерными слоями карбида бора на одной и обеих границах в зависимости от толщины этих слоев.

Наибольшее увеличение коэффициента отражения до значений $R \cong (11 \pm 2) \%$ достигается при осаждении буферных слоев В₄С на слои Cr.

**Рис. 3.** Зависимость коэффициента отражения от толщины буферных слоев В₄С в МРЗ на основе Cr/Ti.

5. МРЗ на основе Sc

Более 30 лет назад многослойная структура Cr/Sc была предложена как наиболее перспективная для спектрального диапазона, соответствующего „окну прозрачности воды“ [26,27]. Теоретически такие зеркала могут обеспечивать до 60 % пикового отражения при нормальном падении вблизи L -края скандия (длина волны 3.12 nm), что делает систему Cr/Sc привлекательной основой для оптики микроскопов в мягкой рентгеновской области.

Однако первые реализованные образцы демонстрировали значительно более низкое отражение — менее 10 % на длине волны 3.14 nm. Такое расхождение с теоретическим пределом объясняется не только шероховатостью межслоевых границ, но и технологическими трудностями в поддержании строгой периодичности структуры, состоящей из сотен слоев с периодом $d = 1.58$ nm.

Последующее совершенствование методов синтеза позволило повысить отражательную способность: сначала до 14.5 % [28], затем до 17 % [29] и, наконец, до 21 % [30] при $\lambda = 3.12$ nm. В этих работах также были определены толщины переходных областей: для границы Cr-на-Sc — 0.41 nm, для Sc-на-Cr — 0.35 nm.

Для дальнейшего уменьшения толщины переходных слоев и повышения оптического контраста применяются различные методы интерфейс-инжиниринга: подача напряжения смещения на подложку [31], ионное асистирирование при напылении [32], введение примесей кислорода и азота [33], а также использование барьерных слоев B_4C [8,9]. Наилучший результат (23 % при $\lambda = 3.12$ nm) был достигнут при совместном применении двух подходов: внедрения буферного слоя B_4C на поверхность Cr и азотирования слоя Cr в процессе его осаждения [8].

В работе [34] мы провели детальное исследование влияния пассивации азотом поверхностей слоев Cr и Sc, а также распыления материалов в среде смеси газов

аргон + азот на структурные параметры и коэффициенты отражения Cr/Sc-многослойных зеркал.

В итоге показано, что наилучшей отражательной способностью (до 31 % при $\lambda = 3.12$ nm) обладает МРЗ Cr/Sc, в котором поверхность слоев Cr пассивирована в среде $\text{Ar} + 30\% \text{N}_2$ (рис. 4). В этом случае происходит увеличение оптического контраста на границах в структурах Cr/Sc.

Процесс пассивации подразумевает обработку поверхности пленки активным газом, в данном случае азотом. Прореагировавшие с газом атомы пленки впоследствии не вступают в реакцию с атомами другого материала. Таким образом снижается толщина переходной области.

6. МРЗ на основе C

Для МРЗ, рассчитанных на работу в диапазоне длин волн 4.4–6.6 nm, в качестве слабопоглощающего материала оптимально использовать углерод, а в роли сильнопоглощающих материалов подходят хром Cr, кобальт Co и никель Ni. Максимальные коэффициенты отражения для МРЗ нормального падения системы Cr/C ожидаются вблизи K -края поглощения углерода, т.е. на длине волны 4.47 nm.

Систематические исследования МРЗ нормального падения Cr/C для работы на длине волны 4.47 nm в литературе не представлены. Однако в ряде работ [35–41] изучались зеркала с периодами 2.3–4 nm. Наибольший экспериментально достигнутый коэффициент отражения для МРЗ Cr/C составил 15.4 % при угле скольжения 81.62° (длина волны 4.47 nm) [41], что существенно ниже теоретического предела (51 %). Основной причиной такого расхождения считается наличие протяженных (около 0.5 nm) переходных областей на границах слоев.

В настоящей работе исследуется влияние азотной пассивации слоев на структурные и отражательные характеристики МРЗ Cr/C. На рис. 5 приведены зависимости коэффициента отражения от угла скольжения для структур, полученных в чистом аргоне без пассивации, а также для зеркал типа $\text{Cr}/\text{C}_{\text{pass}}$, $\text{Cr}_{\text{pass}}/\text{C}$ и $\text{Cr}_{\text{pass}}/\text{C}_{\text{pass}}$ (где индекс „pass“ означает пассивацию соответствующего слоя). Все исследованные образцы содержали 200 периодов, величина периода составляла 2.39 nm, а доля толщины слоя тяжелого материала (хрома) в периоде — $\beta = 0.44$. Восстановленные структурные параметры синтезированных зеркал приведены в табл. 3.

На основании приведенных данных можно сформулировать следующие выводы.

1. Коэффициент отражения для МРЗ Cr/C без пассивации слоев соответствует результатам, полученным в работе [41].

2. Пассивация углеродных слоев приводит к значительному уменьшению ширины переходной области на границе Cr-на-C с 0.51 до 0.39 nm. При этом коэффициент отражения для структуры Cr/C_{pass} возрастает до 19.5

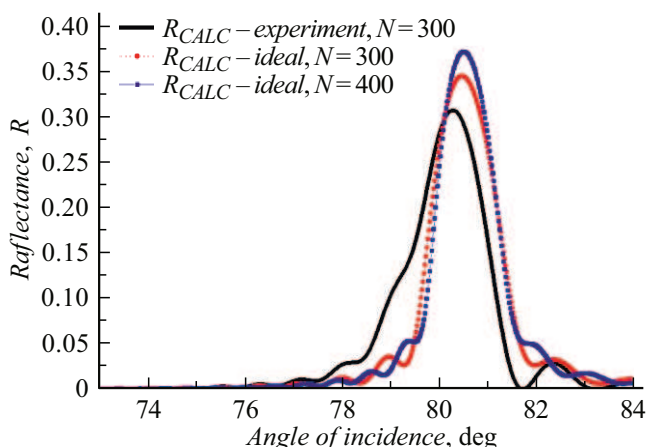


Рис. 4. Данные отражения на длине волны 3.12 nm. Показаны данные с реальным дрейфом периода в МРЗ и для идеальных МРЗ с нулевым дрейфом периода при $N = 300$ и 400 .

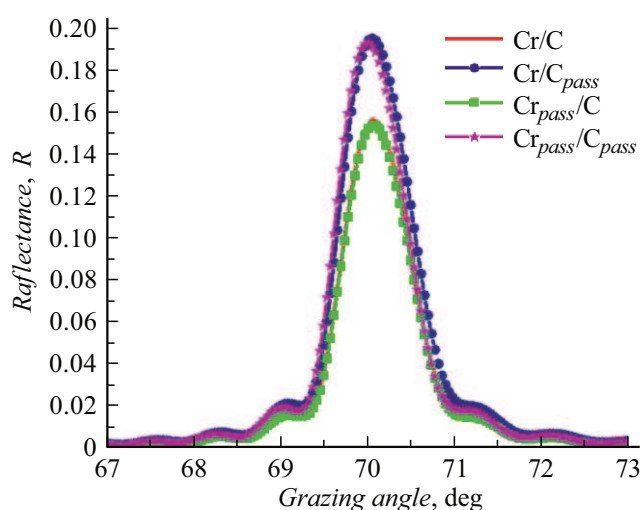


Рис. 5. Зависимости экспериментально измеренного коэффициента отражения от угла скольжения излучения на длине волны $\lambda = 4.47$ нм для структур Cr/C (сплошная кривая), Cr/C_{pass} (кривая с круглыми символами), Cr_{pass}/C (кривая с квадратными символами) и Cr_{pass}/C_{pass} (кривая с символами-звездами).

Таблица 3. Структурные параметры и отражательные характеристики синтезированных образцов

Структура	С-на-Сг интерфейс, Å	Сг-на-С интерфейс, Å	R %
Cr/C	3.6	5.1	15.6
Cr/C _{pass}	3.5	3.9	19.5
Cr _{pass} /C	3.6	5.2	15.3
Cr _{pass} /C _{pass}	3.6	4.1	19.3

3. Пассивация слоев хрома не оказывает влияния на ширину переходной области на границе С-на-Сг. Коэффициент отражения для структуры с пассивацией обоих типов слоев (Cr_{pass}/C_{pass}) совпадает с результатом для Cr/C_{pass}, что подтверждает: именно пассивация углерода положительно сказывается на отражательных характеристиках зеркала, а пассивация хрома — нет.

4. Полученное значение коэффициента отражения является рекордным для МРЗ нормального падения, оптимизированных для работы вблизи К-края поглощения углерода.

7. МРЗ на основе В

Для длин волн $\lambda > 6.65$ нм оптимальными слабопоглощающими материалами выступают бор и его соединения (поскольку К-край поглощения бора находится при $\lambda_K = 6.63$ нм). Среди сильнопоглощающих материалов наиболее перспективны лантан и рутений. Вблизи

К-края бора теоретически более высокие коэффициенты отражения демонстрируют структуры с лантаном, тогда как при $\lambda > 7.5$ нм преимущество получают структуры с рутением.

Структуры на основе лантана исследовались в ряде публикаций [42–45]. Экспериментальные значения коэффициента отражения в этих работах заметно уступали теоретическим максимумам из-за перемешивания материалов на границах слоев. Эффективным способом улучшения межслойных границ оказалось использование газовой смеси аргон + азот: азот подается только при напылении слоев лантана, что приводит к формированию структуры LaN/B. В настоящей работе для такой структуры был достигнут рекордный для данной длины волны коэффициент отражения $R = 64.1\%$ при угле падения 1.56° и $\lambda = 6.65$ нм.

В статьях [46–49] рассматривались МРЗ типа Ru/B₄C для области ЖР излучения. Зеркала Ru/B анализировались только в [50], где было установлено, что переходные слои на границах имеют асимметричную толщину: граница В-на-Ru составляет 0.69 нм, что ограничивает рост отражательной способности, а другая граница — всего 0.2 нм. Применение барьерных слоев (прослоек углерода толщиной 0.3–0.4 нм на наиболее протяженной границе) позволяет уменьшить ширину переходной области примерно вдвое (до 0.37 нм), что приводит к увеличению коэффициента отражения. Теоретически для МРЗ Ru/C/B с такими параметрами ожидается коэффициент отражения до 68.9% при $\lambda = 6.65$ нм, однако экспериментального подтверждения этому пока нет.

8. МРЗ на основе Y и Sr

Диапазон длин волн 9–11 нм представляет значительный интерес для научных и технологических приложений. В частности, он важен для солнечной астрономии [51], поскольку в этом участке спектра находится интенсивная линия излучения иона FeXVIII ($\lambda = 9.34$ нм). Кроме того, данный диапазон перспективен для литографии нового поколения с длиной волны короче 13.5 нм [52], так как здесь располагаются максимумы излучения Кг- и Хе-плазмы [53,54]. Эффективность этих приложений во многом определяется коэффициентом отражения МРЗ, используемых в рентгенооптических схемах.

Согласно теоретическим расчетам, в этом диапазоне оптимальными материалами для слабопоглощающих слоев являются стронций и иттрий, а для сильнопоглощающих — палладий, серебро, родий, рутений и молибден.

Иттрийсодержащие МРЗ активно исследуются в научной литературе. В работах [55–58] были изучены зеркала типа Mo/Y. На практике максимальный коэффициент отражения для таких структур составил около 30% при теоретическом пределе 42% (для $\lambda = 9.34$ нм). Отмечена асимметрия границ раздела: переходный слой

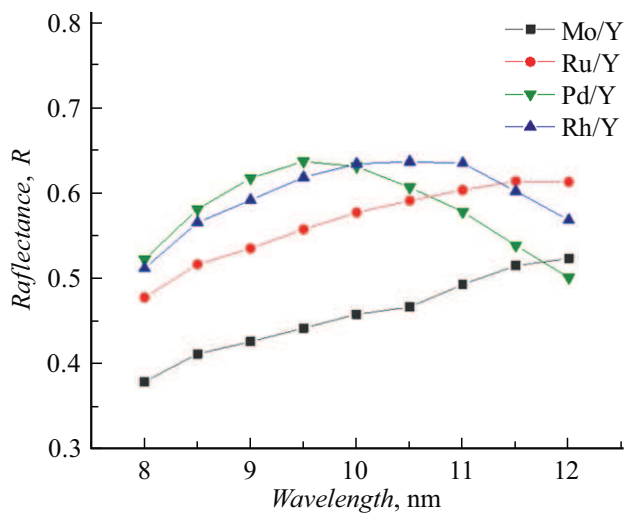


Рис. 6. Теоретические спектральные зависимости коэффициента отражения для идеальных многослойных структур МЗ Pd/Y, Ru/Y, Mo/Y и Rh/Y.

на границе Y-на-Mo имеет толщину около 0.33 nm, а на границе Mo-на-Y — 0.7 nm. Применение метода барьерных слоев позволило уменьшить ширину перехода Mo-на-Y и повысить коэффициент отражения до 32 % (измерено при $\lambda = 9.34$ nm). На сегодняшний день наибольшее экспериментальное значение отражения для оптимизированных Mo/Y-зеркал на этой длине волны составляет 34 % и приведено в [58].

Теоретически максимальные коэффициенты отражения (до 65 %) в окрестности $\lambda = 9.34$ nm могут быть достигнуты для МЗ типа Pd/Y, Rh/Y и Ru/Y (рис. 6).

Экспериментальные значения коэффициента отражения, близкие к теоретическому максимуму, достигнуты не были. Наилучший результат для системы Pd/Y с барьерными слоями В₄С составил 43 % на длине волны 9.4 nm [59]. Однако отмечается деградация оптических свойств: за 16 месяцев наблюдений коэффициент отражения снизился до 34 %.

Также были исследованы системы на основе Ag/Y [60,61]. Было установлено, что их отражательная способность чувствительна к материалу верхнего слоя. Максимальный достигнутый коэффициент отражения для структуры Ag/Si/Y (где Si — барьерный слой) составил 18 % на длине волны 9.34 nm. Это значительно уступает характеристикам зеркал на основе Mo/Y и Pd/Y.

В работах [62–64] изучались зеркала Ru/Y. В исследовании были оптимизированы структуры Ru/Y и Ru/B₄C/Y для работы на длинах волн 9.4 и 11.4 nm. Анализ показал значительную асимметрию интерфейсов: граница Y-на-Ru имеет шероховатость 0.2 nm, а граница Ru-на-Y — 1.3 nm. Использование слоев карбида бора позволило уменьшить межслоевую диффузию и повысить коэффициент отражения до 40 % на длине волны 9.34 nm (спектральная полуширина пика $\Delta\lambda = 0.16$ nm) (рис. 7, а). Для структур, оптимизированных под 11.2 nm,

был зафиксирован рекордный для данной группы материалов коэффициент отражения — 56 %, что приближается к теоретическому пределу (рис. 7, b). При этом долговременные испытания (несколько месяцев) не выявили изменений коэффициента отражения на длине волны 9.34 nm, что свидетельствует о высокой стабильности этих зеркал.

В работе [65] были исследованы МЗ на основе системы Mo/Sr. Для данных структур был достигнут коэффициент отражения 40.8 % на длине волны 9.4 nm, что значительно ниже теоретического предела (более 70 %). Основным недостатком таких зеркал стала крайне низкая временная стабильность: из-за высокой химической активности стронция тонкопленочные структуры быстро окислялись. В течение 24 h после синтеза коэффициент отражения снижался до значений ниже 1 %, что делает их непригодными для практического применения. Попытки пассивации поверхности и создания углеродного защитного слоя не привели к положительному результату.

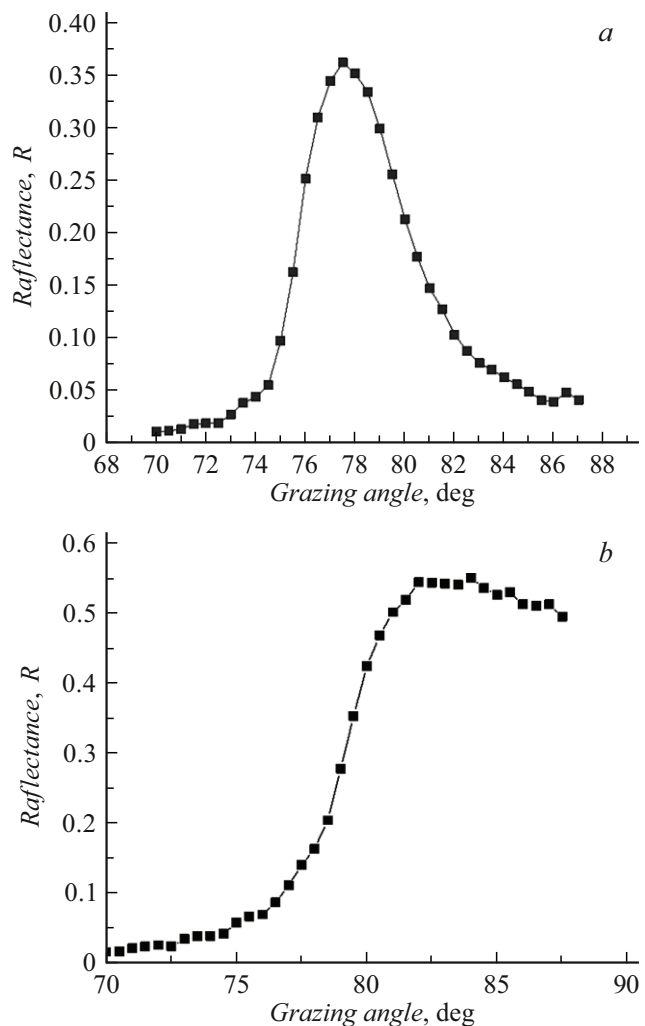


Рис. 7. Угловые зависимости экспериментально полученных коэффициентов отражения МЗ Y/B₄C/Ru на длинах волн 9.34 (а), 11.4 nm (b).

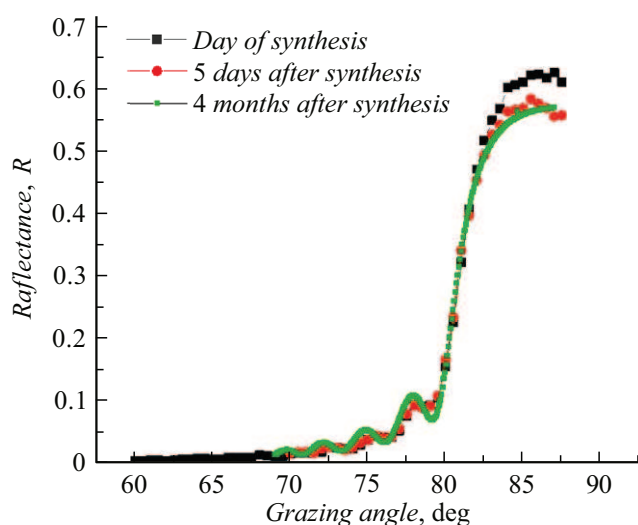


Рис. 8. Измерение коэффициента отражения МРЗ Sr/B₄C/Ru на длине волны 11.4 нм в день напыления, через 5 дней после напыления и через 2 месяца после напыления.

Дальнейшие исследования, проведенные в ИФМ РАН [66], были направлены на изучение МРЗ на основе системы Ru/Sr. В работе анализировалось влияние барьерных слоев В₄С на оптические характеристики и стабильность зеркал.

Изначально двухкомпонентные МРЗ Ru/Sr также демонстрировали неудовлетворительную стабильность. Коэффициент отражения на длине волны 9.34 нм падал с 40 % до околонулевых значений за несколько дней. Моделирование показало, что деградация сопровождается значительным увеличением протяженности переходных областей (до 3 нм при периоде 4.8 нм) и окислением стронция.

Для решения проблемы нестабильности на границу раздела Ru-на-Sr наносились барьерные слои В₄С. Измерения проводились на длинах волн 9.34 и 11.4 нм. Для структур с периодом 5.87 нм (оптимизированных под $\lambda = 11.4$ нм) сразу после изготовления был зафиксирован высокий коэффициент отражения $R = 62.4\%$. Последующее наблюдение в течение нескольких месяцев показало сохранение высокого уровня отражения на уровне около 60 % (рис. 8), что свидетельствует об эффективности данного подхода.

МРЗ для $\lambda = 9.34$ нм имело период 4.8 нм. Исследования показали, что МРЗ Ru/Sr обладает рекордным значением коэффициента отражения $R = 48\%$ на длине волны 9.34 нм. При этом отсутствует временная деградация отражательных характеристик. Это подтверждается хорошим совпадением лабораторных измерений, проведенных в день синтеза, и синхротронных измерений, проведенных через несколько месяцев после синтеза.

9. МРЗ на основе Ве

Зеркала на основе бериллия вызывают устойчивый интерес благодаря возможности достижения высоко-

го коэффициента отражения (свыше 70 %) вблизи К-края поглощения бериллия ($\lambda = 11.2$ нм), что особенно актуально для литографии с рабочей длиной волны около 11.2 нм. В ряде исследований МРЗ Мо/Ве [67–69] был достигнут пиковый коэффициент отражения 70.2 % при теоретическом пределе 75.6 %. В наших работах [70,71] для аналогичных структур зафиксировано значение 70.3 %, а также подробно изучены межслоевые переходные области и влияние барьерных слоев В₄С, С и Si.

Основным препятствием для дальнейшего увеличения отражения являются межслоевые переходные области. Установлено, что границы Мо-на-Ве и Ве-на-Мо имеют протяженность 0.67 и 0.33 нм соответственно, что относительно мало по сравнению с периодом структуры (5.8 нм). Однако дальнейшее уменьшение этих областей и прирост отражения хотя бы на 1 % по абсолютному значению пока не реализованы. Тем не менее даже такой прирост имеет принципиальное значение для литографии: при 12 зеркальных отражениях система с $R = 71\%$ обеспечивает на 20 % большую пропускную способность по сравнению с системой $R = 70\%$, что существенно влияет на экономическую эффективность.

Важным параметром является и спектральное разрешение МРЗ: для Мо/Ве $\Delta\lambda = 0.26$ нм, а для задач литографии желательно его увеличение. Теоретически более высокие показатели отражения и ширины спектра демонстрирует система Ru/Ве ($R = 77.8\%$, $\Delta\lambda = 0.4$ нм), однако экспериментально достигнутые значения оказались ниже ($R = 63.7\%$, $\Delta\lambda = 0.34$ нм) [68]. Это объясняется высокой шероховатостью межслоевых границ и перемешиванием материалов: в структуре Ru/Ве отсутствуют области чистого Ве, а слои Ru перемежаются со сплавом Ru-Ве.

Исследовалась также система Mo_xRu_{x-1}/Ве [72], где вместо чистого рутения использовался сплав Ru-Мо. Максимальный коэффициент отражения составил 69.3 % при $\Delta\lambda = 0.35$ нм, однако стехиометрия сплава не уточнялась. В наших работах для двухкомпонентной структуры Ru/Ве коэффициент отражения составил 67 % при $\Delta\lambda = 0.34$ нм, а также определены параметры межслоевых переходных областей: Ru-на-Ве — 1.1 нм, Ве-на-Ru — 0.45 нм.

Поскольку в системе Мо/Ве границы раздела менее протяженны и отсутствует перемешивание, было предложено внедрить барьерные слои молибдена в структуру Ru/Ве [73,74]. Введение Мо на обе границы раздела позволило существенно улучшить рентгенооптические характеристики зеркал (рис. 9).

Максимальное значение коэффициента отражения составило $R \approx 72.2\%$ при толщинах буферных слоев Мо: Ru-на-Ве — 0.2 нм, а Ве-на-Ru — 0.4 нм, что соответствует наилучшим значениям толщин у систем с буферным слоем на одной границе. При этом $\Delta\lambda = 0.38$ нм.

Дополнительные исследования показали, что улучшение отражательных характеристик достигается благодаря существенному уменьшению перемешивания Ru и Ве.

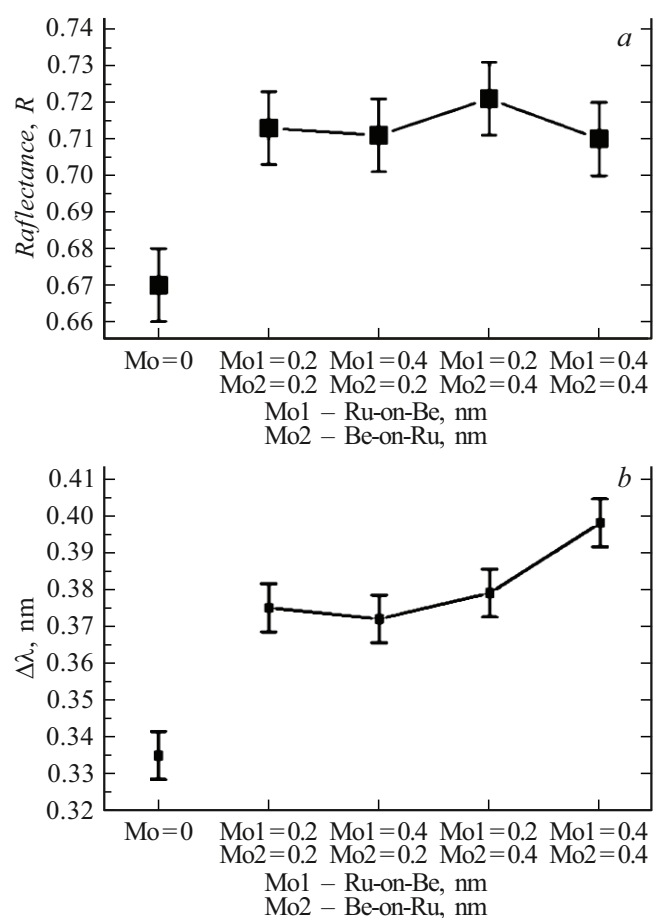


Рис. 9. Зависимости коэффициента отражения (а), спектральной ширины МРЗ [Mo/Be/Mo/Ru] на длине волны 11.4 нм от толщину прослоек Мо в периоде (b).

10. МРЗ на основе Si

Интерес к МРЗ на основе молибдена и кремния во многом обусловлен развитием проекционной литографии и переходом от ультрафиолетовой к экстремальной ультрафиолетовой литографии с рабочей длиной волны 13.5 нм.

Первые исследования МРЗ Mo/Si были проведены еще в 1980-х годах, начиная с работы [75]. В дальнейшем этот интерес не только не ослабевал, но и продолжал расти. Зеркала Mo/Si для диапазона длин волн вблизи 13 нм подробно изучались в ряде работ [76–81], где был достигнут пиковый коэффициент отражения 68 % при теоретическом пределе 74 %. Основной причиной расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями считается наличие протяженных переходных областей на границах раздела слоев. При этом отмечается асимметрия: при осаждении кремния на молибден ширина переходной области составляет 0.5–0.6 нм, а при осаждении молибдена на кремний — 1.0–1.2 нм [82].

Наиболее эффективным способом повышения коэффициента отражения МРЗ Mo/Si признано использование

Таблица 4. Экспериментальные значения коэффициентов отражения для МРЗ Mo/Be/Si на различных длинах волн λ и углах скольжения θ .

λ, nm	$\theta, ^\circ$	$R, \%$
13.8	88.0	71.3
13.78	86.1	71.42
13.49	77.1	71.89
13.20	72.3	72.32
12.92	68.7	72.83

барьерных слоев, т.е. введение третьего материала на поверхность молибдена и/или кремния. Чаще всего в качестве таких барьеров применяют углерод и карбид бора B_4C . Основная задача барьерных слоев — уменьшение протяженности более широкой границы Mo-на-Si. В результате для структур типа Mo/ B_4C /Si/ B_4C и Mo/Si/C был достигнут максимальный коэффициент отражения 70.15 % на длине волны 13.5 нм [83].

В ИФМ РАН, основываясь на результатах работы [71], было предложено использовать в качестве третьего материала бериллий. В структуре Mo/Be/Si (от подложки к поверхности) границы Be-на-Mo и Si-на-Be также характеризуются малой протяженностью (около 0.3 нм). Экспериментально для таких зеркал были получены коэффициенты отражения свыше 71 % при $\lambda = 13.5$ нм и более 72 % при $\lambda = 12.9$ нм [84]. Соответствующие данные представлены в табл. 4.

11. МРЗ на основе Al

Диапазон длин волн 17–30 нм имеет особое значение для солнечной астрономии, поскольку в нем расположены ключевые линии излучения многозарядных ионов, такие как FeXII-FeIX (17.1–19.5 нм), HeII (30.4 нм) и другие. Эти ионы формируются в различных слоях солнечной атмосферы: от переходного слоя (HeII) до внешних областей короны (FeXII), что соответствует широкому диапазону температур возбуждения — 0.05–20 МК. Таким образом, получение изображений Солнца в выбранных спектральных линиях позволяет исследовать распределение температуры плазмы в отдельных слоях короны.

Для наблюдения за короной Солнца необходимы оптические приборы на основе многослойных рентгеновских зеркал, которые должны сочетать высокий коэффициент отражения и высокую спектральную селективность (малую величину $\Delta\lambda$).

В качестве базового материала для МРЗ в спектральной области 17–25 нм используется алюминий, поскольку его L -край поглощения находится при $\lambda_L = 17.04$ нм. К алюминию в качестве парного материала для формирования МРЗ подходит целый ряд веществ. В рабо-

тах [85–91] в этом качестве рассматривались SiC, Mo, Y. На рис. 10 представлены расчетные спектральные зависимости коэффициента отражения для зеркал Al/SiC, Al/Mo, Al/Y, оптимизированных на длину волны 17.9 nm.

Расчетные пиковые коэффициенты отражения для МРЗ на основе пар Al/SiC и Al/Y составляют 55 %–70 % при спектральной ширине около 0.6 nm. Для МРЗ Al/SiC [85–89] в экспериментах был получен коэффициент отражения $\approx 38\%$ [88], что ниже теоретического значения 47 % из-за перемешивания материалов на границах слоев; межслоевая шероховатость оценивалась как $\sigma \approx 2.8$ nm при периоде $d \approx 9$ nm. Для зеркал Al/Mo максимальный коэффициент отражения составил 33.5 % [90,91] по причине высокой шероховатости алюминиевых слоев. МРЗ на основе Al/Y [85] показали быструю деградацию из-за взаимодиффузии и окисления.

Применение барьерных слоев позволило повысить характеристики: для структур Al/Mo/SiC и Al/Mo/B₄C достигнут пиковый коэффициент отражения $R = 55\%$ при $\Delta\lambda = 0.875$ nm [92,93]. Для обсерватории ТЕСИС были синтезированы МРЗ Al/Zr с $R \approx 56\%$ и $\Delta\lambda = 0.6$ nm [94]. Для узкополосных зеркал в области $\lambda \approx 17$ –20 nm исследованы МРЗ Al/Si с долей кремния в периоде, показавшие $R = 45\%$ –50 % при $\Delta\lambda < 0.4$ nm [95].

Перспективны также зеркала на основе бериллия благодаря его низкому поглощению и значительной разнице показателей преломления с алюминием и магнием. В работе предложены МРЗ Be/Al [96], где бериллий — сильнопоглощающий, а алюминий — слабопоглощающий материалы, что обеспечивает малое поглощение, большую глубину экстинкции и высокую спектральную селективность. В оптимизация структуры, включая толщины барьерных слоев кремния, позволила достичь $R = 62.5\%$ на $\lambda = 17.14$ nm при $\Delta\lambda = 0.4$ nm [97]. МРЗ Be/Si/Al отличаются высокой временной стабильностью отражательных характеристик (рис. 11).

За два года хранения при комнатной температуре оптические характеристики зеркала не претерпели изменений.

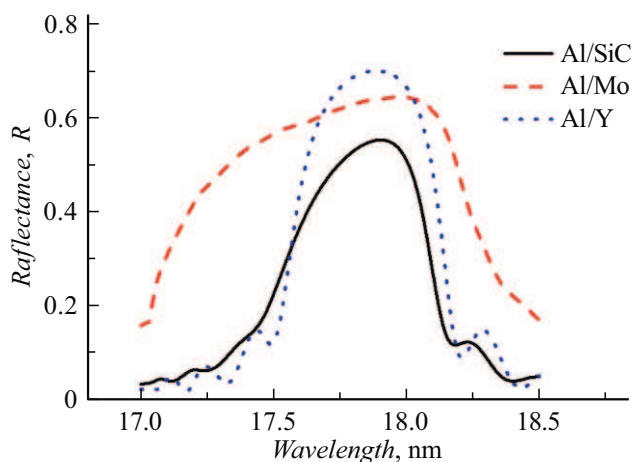


Рис. 10. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения Al/SiC, Al/Mo, Al/Y МРЗ.

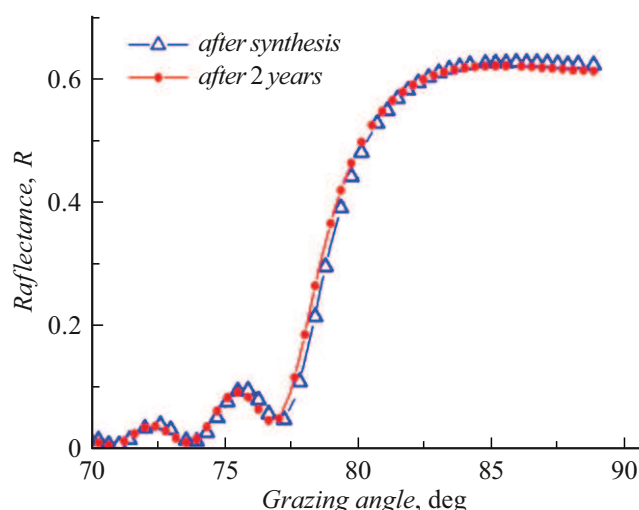


Рис. 11. Сравнение угловых зависимостей коэффициентов отражения, полученных в разное время для МРЗ Be/Si/Al, оптимизированного на скользкий угол падения 85° . Измерения проводились на длине волны 17.1 nm.

На основе анализа свойств зеркал Zr/Al, Si/Al и Be/Al была разработана новая четырехкомпонентная структура Al/Zr/Be/Si. В ее основу легли три ключевых принципа: использование максимального теоретического коэффициента отражения пары Zr/Al, частичная замена циркония на менее поглощающий бериллий, а также введение кремниевого буферного слоя для сглаживания границ раздела.

В работе [97] предложена структура Zr/Be/Si/Al, оптимизированная для спектрального диапазона 17–20 nm. Эта структура демонстрирует рекордные для данного диапазона значения пикового коэффициента отражения и спектральной селективности. Экспериментально достигнуты коэффициенты отражения до 67 % вблизи длины волны 17.1 nm и 55 % вблизи 19.5 nm при спектральной ширине $\Delta\lambda = 0.63$ –0.65 nm. За два года наблюдений не выявлено заметной деградации отражательных свойств, что свидетельствует о высокой стабильности и перспективности данного материала для будущих солнечных миссий.

Кроме того, исследована структура Be/Si/Al с периодом, оптимизированным под длину волны 30.4 nm (линия излучения иона HeII, характерная для солнечной короны) [98,99]. Оптимальные параметры: период $d = 16.7$ nm, толщина алюминиевого слоя $d_{Al} = 8.7$ nm. Были изготовлены два типа зеркал: Be/Al и Be/Si/Al с толщиной кремниевой прослойки 1 nm. Угловые зависимости коэффициентов отражения для этих зеркал представлены на рис. 12 (измерения выполнены на лабораторном рефлектометре с монохроматором ЛНТ-30).

Можно отметить очевидное преимущество в отражательной способности образца с барьерным слоем Si. Пиковое значение коэффициента отражения для МРЗ Be/Si/Al составило около 34 %, для МРЗ Be/Al около 20 %. Таким образом, можно констатировать, что

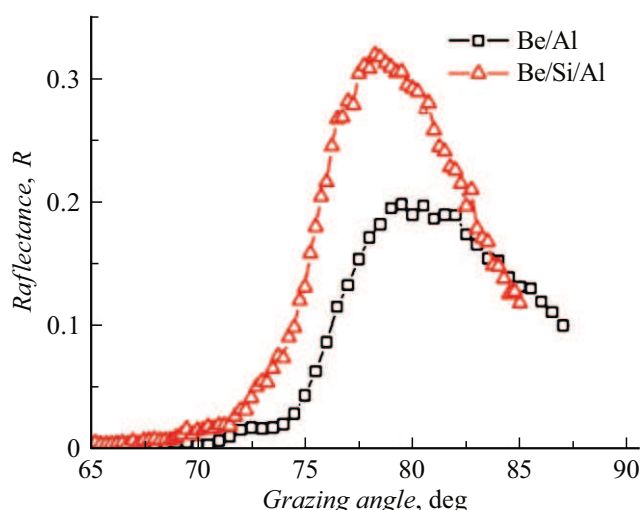


Рис. 12. Угловые зависимости коэффициентов отражения для МРЗ Be/Al и Be/Si/Al, оптимизированных на скользящий угол падения 80° . Измерения проводились на длине волны 30.4 nm.

сглаживающий эффект от прослоек Si имеет место и для толщин пленок алюминия 8.7 nm. При этом величина спектральной селективности составляет 32.7 или $\Delta\lambda = 0.93$ nm.

12. МРЗ на основе Mg

L — край поглощения магния ($\lambda_L = 25$ nm) определяет возможность создания многослойных зеркал на основе магнийсодержащих структур. Теоретически для пар SiC/Mg, B_4C /Mg и Si/Mg достижимы коэффициенты отражения до 60%. Однако экспериментальные исследования [94,100,101] выявили два ключевых недостатка: значительное расхождение между расчетными и измеренными значениями, а также низкую временную стабильность отражательных характеристик. Например, для зеркал Si/Mg коэффициент отражения снижался до $R = 5.6\%$ ($\lambda/\Delta\lambda = 22$), а для B_4C /Mg — до $R = 0.2\%$ ($\lambda/\Delta\lambda = 16$). Более устойчивыми оказались структуры SiC/Mg, у которых за пять лет R уменьшилось с 42%–44% до 30% [102].

Основной причиной расхождений считается перемешивание материалов на границах слоев, для борьбы с которым применяют барьерные слои. Наилучшее сочетание пикового коэффициента отражения и спектральной полосы пропускания продемонстрировала четырехкомпонентная структура Si/ B_4C /Mg/Cr: сразу после напыления $R = 46\%$ при $\Delta\lambda = 1$ nm, но через год из-за окисления R снижалось до 30% и оставалось на этом уровне [95].

Таким образом, барьерные слои лишь частично решают проблему деградации, а определяющим фактором остается высокая химическая активность магния и его склонность к окислению.

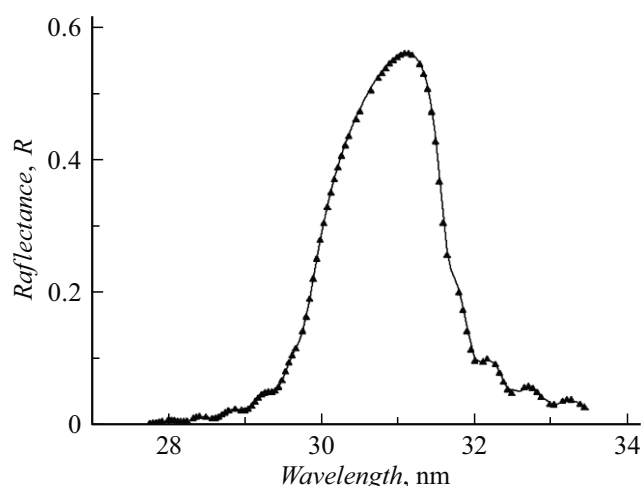


Рис. 13. Спектральные зависимости коэффициентов отражения МРЗ [Be/Mg]/Be/Al для образца, хранившегося на атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия).

В работе [102] исследованы зеркала Be/Mg, оптимизированные на длину волны 30.4 nm. Для повышения временной стабильности тестировались различные защитные покрытия. Наилучшие результаты показала пленка алюминия толщиной 13 nm. Структура [Be/Mg]/Be/Al продемонстрировала абсолютную стабильность отражательных характеристик в течение 9 месяцев как в вакууме, так и на воздухе. При этом достигнут рекордно высокий коэффициент отражения $R = 56\%$ при умеренной спектральной полосе $\Delta\lambda = 1.6$ nm ($\lambda/\Delta\lambda \approx 20$).

Спектральные зависимости коэффициентов отражения для образцов [Be/Mg]/Be/Al (хранившихся на воздухе и в вакууме) приведены на рис. 13. Измерения выполнены спустя 9 месяцев после напыления при угле падения 2° .

Заключение

Основным результатом настоящей работы стало следующее. В работе предложена новая пара материалов Be/Mg для спектральной области 30 nm. При использовании верхнего защитного слоя пленки Al толщиной 13 nm были получены рекордные коэффициенты отражения, до 56% и достаточно узкая спектральная полоса пропускания $\Delta\lambda = 1.6$ nm ($\lambda/\Delta\lambda \approx 20$). Наблюдение за этими зеркалами в течение 9 месяцев не выявило деградации коэффициента отражения. Это указывает на большие перспективы этой пары материалов для будущих миссий по изучению Солнца.

В качестве завершающего вывода из представленного обзора приведем рис. 14 и табл. 5, суммирующих основные сведения об отражательных характеристиках многослойных зеркал нормального падения для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн.

Таблица 5. Наилучшие экспериментально достигнутые коэффициенты отражения R

Длина волн, nm	2.74	3.12	4.47	6.63	9.34	11.25	13.5	17.1	30.4
R	0.11	0.31	0.15	0.64	0.49	0.72	0.72	0.67	0.56

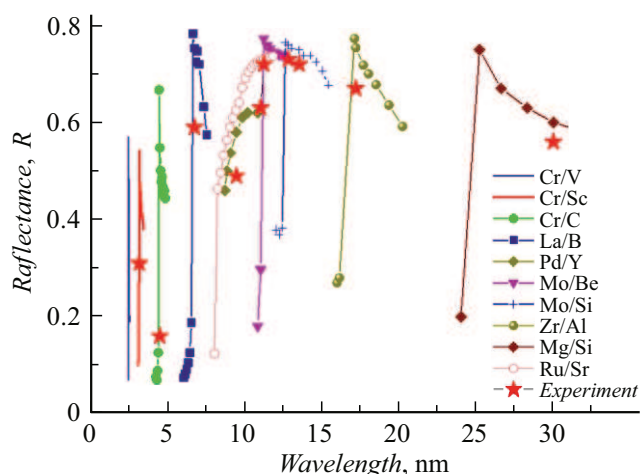


Рис. 14. Теоретические зависимости коэффициентов отражения для идеальных МРЗ ряда пар элементов (линии с символами) и экспериментально достигнутые в ИФМ РАН значения отражения (символы-звездочки).

Благодарности

Изучение многослойных зеркал в диапазоне 2.4–11.4 nm выполнено при поддержке гранта РФФ 21-72-30029-П, изучение многослойных зеркал в диапазоне 11.4–30.4 nm выполнено при поддержке гранта РФФ 21-72-20108-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.-P. Haelbich, C. Kunz. *Optics Commun.*, **17** (3), 287 (1976).
- [2] A.F. Jankowski. *Opt. Engineer.*, **29** (8), 968 (1990). DOI: 10.1117/12.55683
- [3] H. Takenaka, T. Kawamura, H. Kinoshita. *Thin Solid Films*, **288** (1-2), 99 (1996). DOI: 10.1016/S0040-6090(96)08837-2
- [4] E.Y. Jiang, H.L. Bai, R.Y. Tian, C.D. Wang. *J. Appl. Phys.*, **81**, 184 (1997). DOI: 10.1063/1.363839
- [5] A.B. Виноградов, Б.Я. Зельдович. *Опт. и спектр.*, **42** (4), 709 (1977).
- [6] N. Ghafoor, F. Eriksson, E. Gullikson, L. Hultman, J. Birch. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091913 (2008). DOI: 10.1063/1.2857459
- [7] D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, R.W.E. van de Kruijs, E. Louis, F. Bijkerk. *Opt. Lett.*, **40** (16), 3778 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.003778

- [8] C. Burcklen, S. de Rossi, E. Meltchakov, D. Denetiere, B. Capitanio, F. Polack, F. Delmotte. *Opt. Lett.*, **42** (10), 1927 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.001927
- [9] M. Prasciolu, A.F. Leontowich, K.R. Beyerlein, S. Bajt. *Appl. Opt.*, **53** (10), 2126 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.002126
- [10] N. Kaiser, S. Yulin, M. Perske, T. Feigl. *Proc. SPIE*, **7101**, 71010Z (2008). DOI: 10.1117/12.796150
- [11] S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (6), 4074 (2002). DOI: 10.1143/JJAP.41.4074
- [12] S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Klunov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, S.Yu. Zuev. *Central Europ. J. Phys.*, **1**, 191 (2003). DOI: 10.2478/BF02475561
- [13] С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, М.В. Свечников. *Квант. электрон.*, **47** (4), 385 (2017).
- [14] M. Svechnikov, D. Pariev, A. Nechay, N. Salashchenko, N. Chkhalo, Yu. Vainer, D. Gaman. *J. Appl. Cryst.*, **50** (5), 1428 (2017).
- [15] M. Svechnikov. *J. Appl. Crystallogr.*, **53** (1), 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X
- [16] M.N. Drozdov, Y.N. Drozdov, N.I. Chkhalo, V.N. Polkovnikov, P.A. Yunin, M.V. Chirkin, G.P. Gololobov, D.V. Suvorov, D.J. Fu, V. Pelenovich, A. Tolstogousov. *Thin Solid Films*, **661**, 65 (2018). DOI: 10.1016/j.tsf.2018.07.013
- [17] N. Kumar, R.S. Pleshkov, A.V. Nezhdanov, P.A. Yunin, V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, A.I. Mashin. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **23**, 23303 (2021).
- [18] *Комплексный спектрометр Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi — РЦ «Физические методы исследования поверхности»* [Electronic resource] — URL: <https://surface.spbu.ru/ru/oborudovanie/2-uncategorised/4-kompleksnyj-spektrometr-thermo-scientific-escalab-250xi.html>
- [19] НАНОФЭС [Electronic resource] <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/beamlines/nanopes/index.shtml>
- [20] E.M. Gullikson, F. Salmassi, A.L. Aquila, F. Dollar. *Progress in short period multilayer coatings for water window applications* (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008). <http://escholarship.org/uc/item/8hv7q0hj>
- [21] Q. Huang, J. Fei, Y. Liu, P. Li, M. Wen, C. Xie, P. Jonnard, A. Giglia, Z. Zhang, K. Wang, Z. Wang. *Opt. Lett.*, **41** (4), 701 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.000701
- [22] R. Qi, Q. Huang, J. Fei, I.V. Kozhevnikov, Y. Liu, P. Li, Z. Zhang, Zh. Wang. *Materials*, **12** (18), 2936 (2019). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12182936>
- [23] N. Ghafoor, Per O. Å. Persson, J. Birch, F. Eriksson, F. Schafers. *Appl. Opt.*, **45** (1), 37 (2006). DOI: 10.1364/AO.45.000137
- [24] P. Sarkar, A. Biswas, S. Rai, H. Srivastava, S. Mandal, M.H. Modi, D. Bhattacharyya. *Vacuum*, **181**, 109610 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109610>

- [25] С.А. Гарахин, Е.С. Антюшин, М.М. Барышева, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Р.С. Плешков, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **94** (8), 1250 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58552.162-24
- [26] Е.А. Шамов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашенко. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **9**, 60 (1996).
- [27] N.N. Salashchenko, E.A. Shamov. *Opt. Commun.*, **134** (1), 7 (1997). DOI: 10.1016/s0030-4018(96)00551-2
- [28] F. Eriksson, G.A. Johansson, H.M. Hertz, E.M. Gullikson, U. Kreissig, J. Birch. *Opt. Lett.*, **28**, 2494 (2003). DOI: 10.1364/ol.28.002494
- [29] F. Schäfers, S. Yulin, T. Feigl, N. Kaiser. *Proc. SPIE*, **5188**, 138 (2003).
- [30] В.Н. Полковников, С.А. Гарахин, Д.С. Квашенников, И.В. Малышев, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **90** (11), 1893 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49980.143-20
- [31] T. Kuhlmann, S. Yulin, T. Feigl, N. Kaiser, T. Gorelik, U. Kaiser, W. Richter. *Appl. Opt.*, **41**, 2048 (2002). DOI: 10.1364/AO.41.002048
- [32] A. Guggenmos, R. Rauhut, M. Hofstetter, S. Hertrich, B. Nickel, J. Schmidt, E.M. Gullikson, M. Seibald, W. Schnick, U. Kleineberg. *Opt. Express*, **21**, 21728 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.021728
- [33] N. Ghafoor, F. Eriksson, E. Gullikson, L. Hultman, J. Birch. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091913 (2008). DOI: 10.1063/1.2857459
- [34] R.M. Smertin, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, I.V. Malyshev, V.N. Polkovnikov. *Opt. Express*, **32** (15), 26583 (2024). DOI: 10.1364/OE.524921
- [35] J.T. Zhu, B. Wang, Z. Zhang, H.C. Wang, Y. Xu, F.L. Wang, Z.S. Wang, L.Y. Chen, M.Q. Cui. *X-Ray Lasers*, **547** (2006). DOI: 10.1007/978-1-4020-6018-2_70
- [36] M. Wen, L. Jiang, Z. Zhang, Q. Huang, Z. Wang, R. She, H. Feng, H. Wang. *Thin Solid Films*, **592**, 262 (2015). DOI: 10.1016/j.tsf.2015.06.005
- [37] S. Deng, H. Qi, K. Yi, Z. Fan, J. Shao. *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 7434 (2009). DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.04.014
- [38] H. Takenaka, S. Ichimaru, K. Nagai, T. Ohchi, H. Ito, E.M. Gullikson. *Surf. Interface Anal.*, **37**, 181 (2005). DOI: 10.1002/sia.1959
- [39] M. Niibe, M. Tsukamoto, T. Iizuka, A. Miyake, Y. Watanabe, Y. Fukuda. *Intl. Symp. on Optical Fabrication, Testing, and Surface Evaluation* (1992). DOI: 10.1117/12.132127
- [40] J. Feng, Q. Huang, R. Qi, X. Xu, H. Zhou, T. Huo, A. Giglia, X. Yang, H. Wang, Z. Zhang, Z. Wang. *Opt. Express*, **27** (26), 38493 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.038493
- [41] S.S. Andreev, M.M. Barysheva, Yu.A. Vainer, P.K. Gaikovich, D.E. Pariev, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. *Surf. Thin Films*, **58**, 505 (2013). DOI: 10.1134/S1063774513030036
- [42] S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev. *Tech. Phys.*, **55** (8), 168 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210080153
- [43] N.I. Chkhalo, S. Kunstner, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, S.D. Starikov. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 011602 (2013). DOI: 10.1063/1.4774298
- [44] P. Naujok, S. Yulin, N. Kaiser, A. Tünnermann. *Proc. SPIE*, **9422**, 94221K-1 (2015). DOI: 10.1117/12.2085764
- [45] D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, R.W.E. van de Kruijs, E. Louis, F. Bijkerk. *Opt. Lett.*, **40** (16), 3778 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.003778
- [46] T.D. Nguyen, R. Gronsky, J.B. Kortright. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **280** (1993). DOI: 10.1557/PROC-280-161
- [47] C. Borel, C. Morawe, A. Rommeveaux, C. Huguenot, J.-C. Peffen. *Proc. SPIE*, **6317**, 63170I-1 (2006). DOI: 10.1117/12.678472
- [48] C. Borel, C. Morawe, E. Ziegler, T. Bigault, J.-Y. Massonnat, J.-C. Peffen, E. Debourg. *Proc. SPIE*, **5918**, 591801 (2005). DOI: 10.1117/12.613873
- [49] Q. Huang, Y. Liu, Y. Yang, R. Qi, Y. Feng, I.V. Kozhevnikov, W. Li, Z. Zhang, H. Jiang, L. Zhang, A. Li, J. Wang, Z. Wang. *Opt. Express*, **26** (17), 21803 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.021803
- [50] Р.А. Шапошников, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, С.А. Гарахин. *Письма в ЖТФ*, **51** (1), 57 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.01.59524.20075
- [51] D. Martínez-Galarce, R. Soufli, D.L. Windt, M. Bruner, E. Gullikson, S. Khatri, E. Spiller, J.C. Robinson, S. Baker, E. Prast. *Opt. Eng.*, **59** (2), 095102-1 (2013). DOI: 10.1117/1.OE.52.9.095102
- [52] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *AIP Advances*, **3** (8), 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354
- [53] A.N. Nechay, S.A. Garakhin, A.Ya. Lopatin, V.N. Polkovnikov, D.G. Reunov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo, N.N. Tsybin. *Quant. Electron.*, **50** (4), 408 (2020). DOI: 10.1070/QEL17269
- [54] N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, S.Yu. Zuev. *AIP Advances*, **8**, 105003 (2018). DOI: 10.1063/1.5048288
- [55] Z. Wang, H. Wang, J. Zhu, Y. Xu, S. Zhang, C. Li, W. Fengli, Z. Zhang, Y. Wu, X. Cheng, L. Chen, A. Michette, S.J. Pfauntsch, A.K. Powell, F. Schäfers, A. Gaupp, M.A. Macdonald. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 241120 (2006). DOI: 10.1063/1.2405874
- [56] P. Gupta, T.P. Tenka, S. Rai, M. Nayak, G. Lodha. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 6684 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/21/030
- [57] Д.С. Квашенников, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зув, В.Н. Полковников. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **3**, 14 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819030119
- [58] A.J. Corso, M.G. Pelizzo. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19** (1), 532 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.16477
- [59] D.L. Windt, E.M. Gullikson. *Appl. Opt.*, **54** (18), 5850 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.005850
- [60] C. Montcalm, P.A. Kearney, J.M. Slaughter, B.T. Sullivan, M. Chaker, H. Pepin, C.M. Falco. *Appl. Opt.*, **35** (25), 5134 (1996). DOI: 10.1364/AO.35.005134
- [61] Д.С. Квашенников, С.Ю. Зув, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало, F. Delmotte, E. Meltchakov. *ЖТФ*, **89** (11), 1778 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48343.129-19
- [62] D.L. Windt, S. Donguy, J. Seely, B. Kjoernattawanich, E.M. Gullikson, C.C. Walton, L. Golub, E. DeLuca. *Proceed. SPIE*, **5168**, 1 (2004).
- [63] M.M. Barysheva, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo. *Physics-Uspekhi*, **55** (7), 681 (2012). DOI: 10.3367/UFNe.0182.201207c.0727
- [64] V.N. Polkovnikov, R.A. Shaposhnikov, S.Yu. Zuev, M.V. Svechnikov, M.G. Sertsu, A. Sokolov, F. Schäfers, N.I. Chkhalo. *Opt. Express*, **30** (11), 19332 (2022). DOI: 10.1364/OE.448069
- [65] B. Sae-Lao, C. Montcalm. *Opt. Lett.*, **26** (7), 468 (2001). DOI: 10.1364/OL.26.000468

- [66] R.A. Shaposhnikov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, S.Yu. Zuev. *Opt. Lett.*, **47** (17), 4351 (2022). DOI: 10.1364/OL.469260
- [67] C. Montcalm, S. Bajt, P.B. Mirkarimi, E.A. Spiller, F.J. Weber, J.A. Folta. *Proc. SPIE*, **3331**, Emerging Lithographic Technologies II (1998).
- [68] S. Bajt, R.D. Behymer, P.B. Mirkarimi, C. Montcalm, M.A. Wall. *SPIE*, **3767**, 259 (1999). DOI: 10.1117/12.371125
- [69] P.B. Mirkarimi. *Opt. Engineer.*, **38** (7), 1246 (1999). DOI: 10.1117/1.602170
- [70] A.N. Nechay, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Garakhin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, Yu.A. Vainer, E. Meltchakov, F. Delmotte. *AIP Advances*, **8**, 075202 (2018). DOI: 10.1063/1.5007008
- [71] M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.N. Nechay, D.E. Pariev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.A. Tatarskiy, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, Y.A. Vainer, M.V. Zorina. *Opt. Express*, **26** (26), 33718 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.033718
- [72] S. Bajt. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **18** (2), 557 (2000). DOI: 10.1116/1.582224
- [73] R.M. Smertin, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Garakhin, S.Yu. Zuev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, P.A. Yunin. *Opt. Express*, **30** (26), 46749 (2022). DOI: 10.1364/OE.475079
- [74] R. Smertin, N. Chkhalo, S. Garakhin, V. Polkovnikov, S. Zuev. *Opt. Lett.*, **49** (13), 3690 (2024). DOI: 10.1364/OL.528271
- [75] T.W. Barbee, S. Mrowka, M.C. Hettrick. *Appl. Opt.*, **24** (6), 883 (1985). DOI: 10.1364/AO.24.000883
- [76] A.K. Petford-Long, M.B. Stearns, C.H. Chang, S.R. Nutt, D.G. Stearns, N.M. Ceglio, A.M. Hawryluk. *J. Appl. Phys.*, **61** (4), 1422 (1987).
- [77] R.S. Rosen, D.G. Stearns, M.A. Viliardos, M.E. Kassner, S.P. Vernon, Y. Cheng. *Appl. Opt.*, **32** (34), 6975 (1993). DOI: 10.1364/AO.32.006975
- [78] J.M. Slaughter, P.A. Kearney, D.W. Schulze, C.M. Falco, C.R. Hills, E.B. Saloman, R.N. Watts. *Proc. SPIE*, **1343**, 73 (1990). DOI: 10.1117/12.23177
- [79] J.M. Slaughter, D.W. Schulze, C.R. Hills, A. Mirone, R. Stalio, R.N. Watts, C. Tarrio, T.B. Lucatorto, M. Krumrey, P. Mueller, C.M. Falco. *J. Appl. Phys.*, **76** (4), 2144 (1994). DOI: 10.1063/1.357626
- [80] D.G. Stearns, R.S. Rosen, S.P. Vernon. *Appl. Opt.*, **32** (34), 6952 (1993). DOI: 10.1364/AO.32.006952
- [81] S.S. Andreev, S.V. Gaponova, S.A. Gusev, M.N. Haidl, E.B. Kluekov, K.A. Prokhorov, N.I. Polushkin, E.N. Sadova, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, S.Yu. Zuev. *Thin Solid Films*, **415**, 123 (2002). DOI: 10.1016/S0040-6090(02)00536-9
- [82] S. Braun, H. Mai, M. Moss. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 4074 (2002). DOI: 10.1143/JJAP.41.4074
- [83] I. Nedelcu, R.W.E. van de Kruijs, A.E. Yakshin, E. Louis, F. Bijkerk, S. Mullender. *Proc. SPIE*, **6517**, 65170I (2007). DOI: 10.1117/12.712176
- [84] N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.N. Nechay, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, M.V. Svechnikov, D.A. Tatarsky. *Opt. Lett.*, **42** (24), 5070 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.005070
- [85] D.L. Windt. *Proc. SPIE*, **3448**, 280 (1998). DOI: 10.1117/12.332515
- [86] D.L. Windt, J.A. Bellotti. *Appl. Opt.*, **48** (26), 4932 (2009). DOI: 10.1364/AO.48.004932
- [87] P. Jonnard, K. Le Guen, M.-H. Hu, J.-M. André, E. Meltchakov, C. Hecquet, F. Delmotte, A. Galtayries. *Proc. SPIE*, **7360**, 73600O-1 (2009). DOI: 10.1117/12.820913
- [88] E. Meltchakov, C. Hecquet, M. Roullay, S. De Rossi, Y. Menesguen, A. Jérôme, F. Bridou, F. Varniere, M.-F. Ravet-Krill, F. Delmotte. *Appl. Phys. A*, **98**, 111 (2010). DOI: 10.1007/s00339-009-5445-2
- [89] A. Galtayries, M.-H. Hu, K. Le Guen, J.-M. André, P. Jonnard, E. Meltchakov, C. Hecquet, F. Delmotte. *Surf. Interface Analysis*, **42** (6), 653 (2010). DOI: 10.1002/SIA.3393
- [90] H. Nii, M. Niibe, H. Kinoshita, Y. Sugie. *J. Synchrotron Radiat.*, **5** (3), 702 (1998). DOI: 10.1107/S0909049597019407
- [91] H. Nii, M. Miyagawa, Y. Matsuo, Y. Sugie, M. Niibe, H. Kinoshita. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 5338 (2002). DOI: 10.1143/JJAP.41.5338
- [92] E. Meltchakova, A. Ziani, F. Auchere, X. Zhang, M. Roullay, S. De Rossi, Ch. Bourassin-Bouchet, A. Jérôme, F. Bridou, F. Varniere, F. Delmotte. *Proc. SPIE*, **8168**, 816819-1 (2011). DOI: 10.1117/12.896577
- [93] M.-H. Hu, K. Le Guen, J.M. André, P. Jonnard, E. Meltchakov, F. Delmotte, A. Galtayries. *Opt. Express*, **18** (19), 20019 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.020019
- [94] С.Ю. Зув, С.В. Кузин, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко. *Известия РАН. Серия физическая*, **74** (1), 58 (2010).
- [95] S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.V. Shestov, S.Y. Zuev. *Appl. Opt.*, **55** (9), 2126 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.002126
- [96] N.I. Chkhalo, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, R.A. Shaposhnikov, I.L. Stroulea, M.V. Svechnikov, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev. *Thin Solid Films*, **631**, 106 (2017). DOI: 10.1016/j.tsf.2017.04.020
- [97] V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, N.N. Salashchenko, S.Yu. Zuev. *Opt. Lett.*, **49** (16), 4577 (2024). DOI: 10.1364/OL.534480
- [98] N. Chkhalo, A. Lopatin, A. Nechay, D. Pariev, A. Pestov, V. Polkovnikov, N. Salashchenko, F. Schäfers, M. Sertsu, A. Sokolov, M. Svechnikov, N. Tsybin, S. Zuev. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**, 546 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.16474
- [99] В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало. *УФН*, **190**, 92 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2019.05.038623
- [100] J. Zhu, S. Zhou, H. Li, Q. Huang, Z. Wang, K. Le Guen, M.-H. Hu, J.-M. André, P. Jonnard. *Appl. Opt.*, **49** (20), 3922 (2010). DOI: 10.1364/AO.49.003922
- [101] P. Zuppella, A.J. Corso, P. Nicolosi, D.L. Windt, M.G. Pelizzo. *Proc. SPIE*, **8076**, 807608-1 (2011). DOI: 10.1117/12.886853
- [102] V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, R.S. Pleshkov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, M.V. Svechnikov, S.Yu. Zuev. *Opt. Lett.*, **44** (2), 263 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.000263