

УДК 681.7:621.793:535.3

МНОГОСЛОЙНАЯ ИЗОБРАЖАЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА В ИФМ РАН

© 2019 г. Н. И. Чхало¹, *, Н. Н. Салашенко¹

¹Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: chkhalo@ipmras.ru

В работе дается обзор современного состояния исследований, проводимых в ИФМ РАН в области изображающей многослойной рентгеновской оптики. Описываются развитые методы изучения поверхности подложек для зеркал и аберраций оптических систем, а так же ионно-пучковая технология суперполировки, асферизации и коррекции локальных ошибок формы. Рассказывается о развитии новых методов диагностики и полученных рекордных коэффициентах отражения многослойных интерференционных зеркал на основе бериллия.

DOI: 10.1134/S0367676519020078

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря высоким коэффициентам отражения и возможности нанесения отражающих покрытий на произвольные поверхности многослойные интерференционные зеркала (МИЗ) активно применяются при решении различных научных, технических и технологических задач. Они работают в широком диапазоне длин волн, 0.01–70 нм. На основе МИЗ созданы опытные нанолитографы нового поколения на длине волны 13.5 нм, микроскопы для окон прозрачности кремния (область 13 нм), углерода (5–6 нм) и воды (2.8–4 нм). Наибольший объем информации о физических процессах, происходящих на Солнце, получают путем изучения короны Солнца в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне, длины волн 10–60 нм. В последнее время в связи с появлением сверхмощных фемтосекундных лазеров большой интерес возник к аперийным МИЗ, позволяющим транспортировать, фокусировать, проводить спектральный анализ атто- и даже субатто-секундных импульсов электромагнитного излучения. Широкая полоса отражения аперийных МИЗ позволяет управлять пучками излучения без “размытия” волнового пакета, либо даже укорачивать его во времени [1]. Короткие длина волны и длительность импульса позволяют на 3–5 порядков увеличить плотность мощности излучения в пятне фокусировки и вплотную приблизиться к достижению “пробивных” значений вакуума 10^{28} – 10^{30} Вт · см⁻² [2].

МИЗ широко используются в синхротронных центрах как в ЭУФ, так и в жестком рентгеновском диапазоне, вплоть до 100 кэВ, обеспечивая коллимацию и фокусировку рентгеновского излучения; благодаря большим рабочим углам и

управляемой спектральной полосе пропускания МИЗ превосходят традиционные зеркала скользящего падения как по светосиле, так и по дифракционным искажениям волновых фронтов. Последнее особенно актуально для синхротронов 3–4-го поколений [3].

Свободностоящие (без подложки) многослойные структуры применяются в качестве поляризаторов [4], фазовращателей [5, 6], светоделителей и спектральных фильтров с заданной полосой пропускания [7]. Применение таких элементов на синхротронах позволяет проводить интерференционные состав зондового и вторичного (рассеянные, отраженные, люминесценция) рентгеновских пучков.

При использовании потенциала МИЗ для изображения и транспортировки пучков без искажений волновых фронтов необходима оптика дифракционного качества для рентгеновского диапазона. По сравнению с традиционной оптикой ее точность должна быть, как минимум, на два порядка выше, требуются субнанометровые точности формы и ангстремные шероховатости поверхностей [8]. Традиционные методы изготовления и изучения зеркал не обеспечивают этих требований.

В работе дается обзор современного состояния исследований, проводимых в ИФМ РАН в области изображающей многослойной рентгеновской оптики. Описываются развитые методы изучения поверхности подложек для зеркал и аберраций оптических систем, а так же ионно-пучковая технология суперполировки, асферизации и коррекции локальных ошибок формы. Сообщается о развитии новых методов диагностики и полученных рекордных коэффициентах отражения МИЗ на основе бериллия.

1. ТРЕБОВАНИЕ К ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ ДИФРАКЦИОННОГО КАЧЕСТВА

Из-за короткой длины волны резко возрастают требования к качеству поверхности зеркал. В частности, проведенный в [9] анализ показал, что в отличие от традиционного оптического диапазона в рентгеновском диапазоне на качество изображений оказывают влияние неровности (шероховатости) поверхности зеркал в очень широком диапазоне пространственных частот 10^{-6} – 10^3 мкм $^{-1}$ (латеральные размеры 1 нм–1 м). Этот диапазон условно разделяют на низкочастотные шероховатости (латеральные размеры 1 мм–1 м), это, так называемые, ошибки формы поверхности; среднечастотный – латеральные размеры 1 мкм–1 мм, и высокочастотные 1 нм–1 мкм.

Анализ показывает, что шероховатости с латеральными размерами от 1 мм до апертуры зеркала в основном приводят к искажениям изображения как целого и описываются набором классических aberrаций: астигматизм, кома, сферическая aberrация и др. Согласно критерию Марешаля для обеспечения дифракционного качества изображений, когда пространственное разрешение определяется не ошибками формы зеркал, а дифракцией излучения, суммарная aberrация оптической системы по параметру корня квадратного из среднеквадратического отклонения RMS_{oc} (root mean square) должна удовлетворять условию

$$RMS_{oc} \leq \lambda/14, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения [10]. Для проекционного объектива с числом зеркал N требования к точности каждого зеркала RMS_1 составят

$$RMS_1 \leq \lambda/(14N^{0.5}). \quad (2)$$

Например, для трехзеркального проекционно-объектива микроскопа для “водного” окна прозрачности на длине волны $\lambda = 3$ нм погрешность изготовления формы зеркал должна быть не более 0.12 нм. Эта точность, как минимум, на 2 порядка превышает точность традиционной оптики. Аналогичные требования к шероховатостям ангстремного уровня касаются и среднечастотного, и высокочастотного диапазонов шероховатостей.

Специфика рентгеновского диапазона заключается и в том, что отсутствуют материалы, не поглощающие излучение, поэтому коэффициенты отражения зеркал всегда меньше единицы, а источники излучения, особенно лабораторные, по мощности существенно уступают традиционным источникам оптического диапазона. Поэтому число элементов в многозеркальных рентгенооптических системах стремятся минимизировать, например, путем использования асферических поверхностей, как правило, высоких, от 4-го до 8-го, порядков по параметру отклонения от оси.

Все это приводит к тому, что для создания оптики дифракционного качества для рентгеновского диапазона необходима разработка новых методов и метрологии и формообразования оптических деталей, обеспечивающих ангстремные точности.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ФОРМЫ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ

Традиционно для измерений формы поверхности и aberrаций оптических систем используют интерферометры, чаще всего Физо, в которых производится сравнение фронтов, отраженных от эталонной поверхности и от исследуемой детали [11]. Этот метод обеспечивает ангстремную точность по отношению к эталонному фронту измерений. Однако абсолютная погрешность измерений редко превышает $\lambda/30$ – $\lambda/50$, где λ – рабочая длина волны интерферометра. Чаще всего $\lambda = 632.8$ нм, причем проблема не решается “правильным” эталоном. Как показано в [12], на точность измерений в большей степени влияют деформации оптических элементов в оправе и оптические элементы регистрирующей системы.

Поэтому на практике для изучения сверхточной оптики применяются интерферометры с дифракционной волной сравнения, возникающей в результате дифракции света на малой, порядка длины волны, апертуре [13–15]. Чаще всего это отверстие в металлической пленке. Однако, как было показано в [16], качество сферической волны, генерируемой таким образом, сильно ограничено взаимодействием вторичных волн с краями отверстия и возникновением плазмон-поляритонных мод. Для увеличения интенсивности и уменьшения aberrаций дифракционной волны в [17] предложен новый тип источника эталонной сферической волны – одномодовое волокно с зауженной до субволновых размеров выходной апертурой. Благодаря сферической форме выходной апертуры отмеченные выше негативные эффекты были сильно подавлены, что позволило достичь рекордной рабочей апертуры. Aberrация волнового фронта менее 0.1 нм в числовой апертуре до $NA = 0.25$ – 0.3 , как минимум, в 2 раза превышает возможности ближайших аналогов.

На основе этого источника излучения в ИФМ РАН разработан ряд интерферометров. В частности, вакуумный интерферометр [18] предназначен для изучения объективов, работающих с вертикальным расположением оптической оси. Горизонтальные интерферометры решают специальные задачи. В частности, большой интерферометр (рис. 1а) предназначен для изучения длиннофокусных оптических систем, прежде всего телескопов. Интерферометр имеет оптический стол длиной 5 м, что позволяет изучать системы с таким фокусным

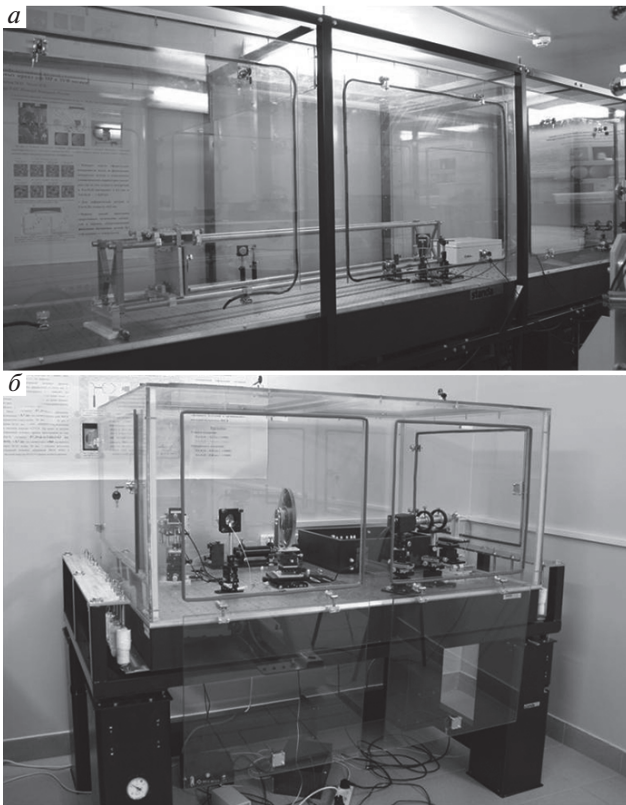


Рис. 1. Горизонтальные интерферометры с дифракционной волной сравнения для изучения длиннофокусных (а) и короткофокусных (б) оптических элементов и систем.

расстоянием без использования дополнительных оптических элементов [19–21].

Интерферометр, приведенный на рис. 1б, используется для изучения аберраций короткофокусных оптических систем [22], измерений шероховатостей среднечастотного диапазона [23], калибров-

ки сверхточных пьезовращателей [24]. Приборы обеспечивают как амплитудный, так и фазовый режимы регистрации и обработки интерферограмм. Для установления соответствия частотных спектров шероховатостей и степени полиномов Цернике, с помощью которых аппроксимируется поверхность, используются соотношения, полученные в [25]. Для устранения воздушных потоков, влияющих на точность измерений, все оптические столы закрыты прозрачными кожухами. В интерферометрах используются стабилизированные как по частоте, так и по мощности He–Ne-лазеры.

Для измерений шероховатости среднечастотного диапазона традиционно применяются интерферометры белого света (ИБС) [26]. Однако, как было показано в [27], из-за ограниченного латерального разрешения, нелинейности и шумов пьезосканеров, сильной чувствительности к внешним вибрациям этот метод хорошо работает до значений эффективной шероховатости на уровне 1 нм, рис. 2. Частично диапазон средних частот (до латеральных размеров 20–40 мкм) перекрывает атомно-силовая микроскопия (АСМ). Однако, как и в случае с ИБС, результаты измерений зависят от нелинейности пьезосканера и, что менее всего можно контролировать в лаборатории, от механической жесткости зондов, которая может заметно отличаться от партии к партии. Иными словами результаты измерений, полученные с помощью ИБС и АСМ, должны быть подтверждены “первопринципными” методами, т.е. периодически должна осуществляться их калибровка.

В ИФМ РАН эта проблема решается следующим образом. Для измерений с помощью АСМ создан стенд и разработана специальная измерительная головка, позволяющие устанавливать локальную нормаль в каждой измеряемой точке по направлению оси зонда криволинейных деталей с

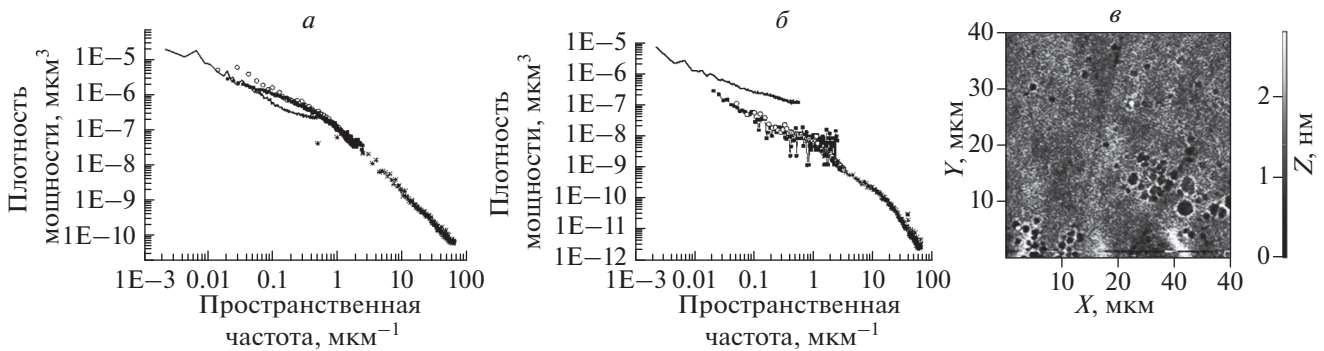


Рис. 2. PSD-функции кварцевых подложек: после глубокой шлифовки полировки, эффективная шероховатость 1.40 нм (а); после дополнительной химико-механической полировки, эффективная шероховатость 0.24 нм (б). На рисунках крестики и полые символы – АСМ, прерывистые линии – ДРПИ, сплошная линия – интерферометр белого света; АСМ-изображение поверхности, подложки из оптической керамики марки Zerodur после ионно-пучковой обработки (в).

максимальной числовой апертурой до $NA = 0.4$ [28]. В качестве “первопринципного” метода для калибровки АСМ использовалось диффузное рассеяние рентгеновского излучения (ДРРИ). Методика ДРРИ базировалась на формализме, развитом в работах И.В. Кожевникова [29, 30]. Из-за малой рассеивающей способности материалов на длине волны 0.154 нм традиционная методика ДРРИ ограничена пространственными частотами на уровне 1–3 мкм⁻¹. Для продвижения в область больших пространственных частот мы использовали стенд с рабочей длиной волны 13.5 нм [31].

Для калибровки ИБС мы впервые применили интерферометрию с дифракционной волной сравнения, которая также может быть отнесена к “первопринципному” методу [23]. Таким образом, мы считаем, что шероховатость поверхности охарактеризована, если спектральные функции плотности мощности шероховатостей (PSD-power spectral density), полученные всеми методами, хорошо совпадают. В качестве меры шероховатости выступает эффективная шероховатость $\sigma_{эфф}^2$, определяемая из следующего соотношения

$$\sigma_{эфф}^2 = \int_{v_{min}}^{v_{max}} PSD(v) dv, \quad (3)$$

где v – пространственная частота и ее максимальные и минимальные значения, соответственно. Результаты такого анализа, проведенного для двух кварцевых подложек, приведены на рис. 2а и 2б. Также мы считаем очень важным для характеристики подложки АСМ изображение поверхности, позволяющее обнаружить дефекты, возникающие при различных воздействиях. В частности, на рис. 2в приведен АСМ-кадр поверхности подложки из оптической керамики марки Zerodur после ионно-пучковой обработки. Несмотря на то, что шероховатость поверхности изменилась незначительно, появились кратеры, указывающие на неоднородность состава этого материала.

3. ИОННО-ПУЧКОВАЯ ПОЛИРОВКА, АСФЕРИЗАЦИЯ И КОРРЕКЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОШИБОК ФОРМЫ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ МИЗ

Ключевой технологией, позволяющей получать асферические поверхности с нанометровой–субнанометровой точностью является формообразование с помощью ионно-пучкового травления (ИПТ) [32, 33]. ИПТ решает три задачи. Первая – финишная суперполировка поверхностей. Вторая – асферизация формы. Третья – коррекция локальных ошибок формы. Успешное решение этих задач потребовало исследовать влияние энергии ионов, угла падения и глубины съема на шероховатость и топологию поверхности. В качестве материалов подложек в основном высту-

пали плавный кварц, оптические керамики с низким коэффициентом теплового расширения (ULE, Zerodur и ситал), а также кремний. Эксперименты проводились на установке, описанной в [34]. Основными результатами исследований стало следующее. Для кварца, керамик и оптического стекла оптимальными углами падения ионов для сохранения и даже сглаживания шероховатостей является 0°–30° от нормали [35, 36]. Глубина травления кварца и ULE в наших экспериментах достигала 10 мкм. Ухудшение как шероховатости, так и топологии поверхности не наблюдалось. При травлении стекла марки К8 глубина съема материала достигала 20 мкм, при этом шероховатость сглаживалась до атомарного уровня, однако в местах неоднородности материала появлялись глубокие кратеры. Из оптических керамик наилучшую стойкость показал Zerodur. Дефекты на поверхности начинали появляться при съеме материала менее 1 мкм. Ситал позволяет проводить травление до чуть более 1 мкм, после чего хоть и медленнее, чем у Zerodur, наблюдается деградация поверхности и увеличение эффективной шероховатости [37]. Оптимальные энергии ионов аргона с компенсацией заряда лежат в диапазоне 600–1000 эВ. Рекордная эффективная шероховатость в диапазоне пространственных частот 0.025–60 мкм⁻¹ составила 0.14 нм и была получена при полировании плавного кварца марки KB ионами ксенона с энергией 600 эВ [38].

При ионно-пучковой полировке металлических поверхностей и пленок не удалось сгладить шероховатость поверхности. Более того, при увеличении энергии ионов более 300 эВ наблюдается сильное развитие шероховатости [39, 40]. Помимо роста шероховатости, в местах наличия примесей и на границах зерен кристаллитов наблюдается “растравливание” поверхности. Также наилучшие параметры достигаются при нормальных углах падения ионов на поверхность.

Для решения проблемы сглаживания шероховатости металлических поверхностей мы предложили метод [41], основанный на полировке аморфных пленок кремния, предварительно нанесенных на поверхность обрабатываемой металлической поверхности. Таким путем поверхности пленок бериллия были сглажены с исходных 1.2 нм до менее 0.3 нм. Аналогичный эффект нами был обнаружен при травлении углеродных пленок ионами водорода [42].

Для полировки, асферизации и локальной коррекции формы подложек была разработана специальная установка, оснащенная пятиосным гониометром, на который устанавливается обрабатываемая деталь. Установка оснащена тремя ионными источниками: ВЧ-источник с диаметром пучка 150 мм, источник с накальным катодом для работы с водородом, размер пучка 90 ×

× 60 мм, и малоразмерный источник с изменяемым в диапазоне 2–10 мм диаметром пучка. Гониометр обеспечивает установку локальной нормали по оси ионного пучка в каждой точке криволинейной поверхности. Максимальный диаметр обрабатываемой детали 300 мм, числовая апертура до $NA = 0.5$.

Ионная полировка и осесимметричная асферизация производятся с помощью пучков с большими диаметрами через диафрагму. В процессе травления деталь вращается. В случае полировки диафрагма изготавливается таким образом, что во всех точках поверхности съём материала одинаков. При асферизации – глубина съёма пропорциональна локальной стрелке прогиба асферики.

В процессе коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерный ионный источник, установленный на однокоординатном столе, подъезжает на заданное расстояние к оси гониометра, а деталь осуществляет 5D-сканирование по специальному алгоритму, учитывающему карту отклонений поверхности детали от требуемой, предварительно измеренной с помощью интерферометров, описанных выше. Подробнее установка и методики формообразования с помощью ионных пучков описаны в [43].

Эта технология широко применяется в ИФМ РАН для решения различных научных и технологических задач. Примеры применения для ЭУФ-литографии можно найти в [44, 45], для космических систем для изучения короны Солнца в ЭУФ и дистанционного зондирования ближнего космоса в ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах [19–21], для рентгеновской микроскопии [46, 47], для коллимации рентгеновских пучков в [48].

4. ТЕХНОЛОГИЯ НАПЫЛЕНИЯ МИЗ

Для нанесения МИЗ на подложки с различной формой поверхности в ИФМ РАН имеются восемь технологических установок: с двумя магнетронами – 2 шт., с четырьмя – 4 шт. и с шестью – 2 шт. Использование большого числа магнетронов (с мишенями из различных материалов) в одной установке продиктовано необходимостью напыления антидиффузионных барьеров между материалами; “жертвенных слоев”, в случае съема МИЗ с подложки или использования ее в качестве свободновисящего рентгенооптического элемента, либо для компенсации стресса в пленках, а также слоев–“крышек”, предотвращающих окисление МИЗ. Для изучения влияния энергии ионов, применяемых для распыления материалов и полировки границ в процессе роста МИЗ, на межслоевую шероховатость и плотность пленок одна из четырех магнетронных установок имеет две ионные пушки позволяющие изготавливать МИЗ мето-

дом ионно-пучкового распыления, и два ионных источника для ионной полировки растущих пленок [49]. Максимальный диаметр подложек, на которые наносятся МИЗ, 400 мм. Требуемое распределение периода МИЗ по поверхности подложки достигается за счет фигурных диафрагм, устанавливаемых между подложкой и магнетронным источником и комбинированного вращения детали вокруг оси установки и собственной оси. Контроль толщины напыляемых пленок осуществляется по параметрам магнетронного разряда: давление рабочего газа, напряжение и ток разряда.

Для изучения характеристик пленок, границ раздела слоев и отражательных свойств МИЗ используется лабораторная рефлектометрия в мягком (МР) и жестком рентгеновском диапазонах. Для проведения этих исследований в МР- и ЭУФ-диапазонах мы имеем два рефлектометра собственной разработки [50, 51]. Для монохроматизации излучения в рефлектометрах используются решеточные спектрометры-монохроматоры скользящего падения РСМ-500 и Jobin Yvon. Спектрометры перекрывают диапазон длин волн от 0.6 до 200 нм. Рефлектометры оснащены гониометрами, обеспечивающими пять степеней свободы для образца и две для детектора. Это позволяет изучать образцы со сложной формой поверхности, с диаметром до 300 мм, толщиной до 50 мм и весом до 10 кг.

Рефлектометры обладают высоким спектральным разрешением, однако из-за низкой интенсивности источников излучения работа проводится только на отдельных спектральных линиях, что резко снижает наши исследовательские возможности. Для решения этой проблемы в ИФМ РАН разработан рефлектометр с лазерно-плазменным источником МР- и ЭУФ-излучения со спектрометром-монохроматором на основе схемы Черни–Тюрнера с плоской дифракционной решеткой [52]. Рефлектометр позволяет изучать зеркала диаметром до 500 мм с непрерывной перестройкой по спектру.

Для калибровки лабораторных рефлектометров мы производим кросс-тесты МИЗ с использованием метрологического оборудования с 11-осевым рефлектометром оптического канала синхротрона BESSY-II [53]. Как правило, результаты измерений совпадают в пределах $\pm 1.5\%$.

Для восстановления структурных параметров МИЗ по данным рентгеновской рефлектометрии в ИФМ РАН разработана так называемая расширенная модель. В отличие от традиционных подходов, использующих в процессе подгонки заранее выбранные ослабляющие факторы на границах, в данной модели эти факторы представляются в виде линейной суперпозиции наиболее часто используемых ослабляющих

Таблица 1. Характеристики рекордных МИЗ нормального падения, изготавливаемых в ИФМ РАН

МИЗ	Длина волны, нм	Коэффициент отражения, %	Публикация
Cr/Sc	3.14	14	[59]
Cr/C	4.47	15	[60]
La/B4C/C	6.67	58	[61]
Mo/Be	11.4	70.2	[62]
Mo/Be/Si	13.5	71.7	[57]
Be/Si/Al	17.14	61.0	[58]
Zr/Be/Si/Al	17.14	67.0	[63]
Be/Si/Al	30.4	34.2	[63]
Be/Mg + Al наверху	30.4	55.5	[63]
Mo/Al + MoSi ₂ наверху	58.4	26.1	[64]

функций, а коэффициенты при этих функциях также являются параметрами подгонки. Такой подход в наибольшей степени учитывает разнообразие физических процессов на границах как в процессе роста МИЗ, так и после различных воздействий. В частности, наличие в этой комбинации “step”-функции позволяет обнаружить стехиометрические слои на границах. Подробнее о модели можно найти в [54].

Дополнительным методом изучения МИЗ является вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), позволяющая изучать химический состав образцов с разрешением по глубине. Несмотря на умеренное, на уровне 1 нм, разрешение по глубине метод оказался весьма эффективным при изучении поверхностных слоев, эффектов применения антидиффузионных барьеров, идентификации примесей и динамики структуры пленок в процессе термического отжига [55, 56]. Мы полагаем, что возможности метода ВИМС для изучения МИЗ еще только начинают использоваться, а потенциал метода не исчерпан отмеченными выше применениями.

Также дополнительную информацию, прежде всего о микроструктуре пленок и переходных слоях в МИЗ, мы получаем с использованием высоко разрешающей электронной микроскопии срезов [57]. Таким образом, мы располагаем всем арсеналом методов для изучения как отражательных характеристик, так и внутреннего строения МИЗ.

В настоящее время изготавливается широкая номенклатура МИЗ из различных, более двадцати, пар материалов. Размер зеркал может изменяться от 4 до 400 мм. В последние годы большое внимание мы уделяем МИЗ на основе бериллия благодаря уникальному сочетанию его рассеивающей способности и поглощения в диапазоне длин волн $\lambda > 17$ нм. Как оказалось, рассеивающая способность Be превышает ряд других, более тяжелых материалов, при этом он имеет поглощение, как у наименее поглощающих в этом диапазо-

не материалов Al и Mg. Это сочетание рассеяния и поглощения позволяет ожидать от бериллий-содержащих МИЗ рекордных значений коэффициентов отражения и спектральной селективности.

Расчеты и эксперименты подтвердили этот качественный анализ. В частности Al/Be-МИЗ обеспечили рекордные, до 61%, коэффициенты отражения в спектральной области 17–18 нм при высокой стабильности отражательных характеристик [58]. Рекордный коэффициент отражения, более 50%, и высокую стабильность во времени продемонстрировали Be/Mg-зеркала с Al верхним слоем на длине волны 30.4 нм. Таким образом, в этом диапазоне длин волн, представляющем огромный интерес для изучения Солнца, бериллий показал себя в качестве наилучшего рассеивающего материала.

В табл. 1 приведены характеристики рекордных МИЗ нормального падения, изготавливаемых в ИФМ РАН. Из таблицы видно, что, во-первых, полученные коэффициенты отражения при нормальном падении составляют около 15% в области длин волн 3–6 нм и 60–70% в спектральной области 6.6–20 нм. Это говорит о том, что уже сейчас с помощью многослойных зеркал можно создавать самые сложные оптические схемы и потенциально достичь дифракционного предела разрешения на уровне длины волны. Во-вторых, в большинстве случаев экспериментальные коэффициенты отражения ниже теоретического предела, а значит, требуется совершенствование технологии роста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дается краткий обзор современного состояния исследований, проводимых в ИФМ РАН в области изображающей многослойной рентгеновской оптики. Описываются развитые методы изучения поверхности подложек для зеркал и аберраций оптических систем, а также ион-

но-пучковая технология суперполировки, асферизации и коррекции локальных ошибок формы. Рассказывается о развитии новых методов диагностики и о полученных рекордных коэффициентах отражения МИЗ на основе бериллия.

Подводя итог, можно утверждать, что в ИФМ РАН создана научно-технологическая база, на основе которой можно разрабатывать приборы и методы с уникальными рентгенооптическими характеристиками как для научных исследований, так и для технических и технологических применений.

Работы выполнены с использованием оборудования ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” ИФМ РАН при поддержке РФФИ (гранты № 16-07-00306, № 16-07-00247, № 17-52-150006, № 17-02-00640, № 18-02-00588, № 18-07-00633, № 18-02-00173, 18-32-00149, 18-32-00173, 18-32-00671 и № 18-42-520007), а также в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0204) и Программ Президиума РАН I.1 “Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом”, I.2 “Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий”, I.1 “Физика конденсированных сред и материалы нового поколения”. Работы по бериллиевым зеркалам проводились при поддержке гранта РФ-DFG 16-42-01034, по ионно-пучковому формообразованию – РФ 17-12-01227.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. // УФН. Т. 185. № 11. С. 1203.
2. Барышева М.М., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. // УФН. 2012. Т. 182. № 7. С. 727.
3. Göbel H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. A270.
4. Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2005. V. A 543. P. 340.
5. Kortright J.B., Underwood J.H. // Nucl. Instr. Methods. 1990. A 291. P. 272277.
6. Андреев С.С., Бибишкин М.С., Кимура Х. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68. № 4. С. 565.
7. Андреев С.С., Зуев С.Ю., Клуенков Е.Б. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2003. № 2. С. 8.
8. Williamson D.M. / Eds. Zernike F., Attwood D.T. // OSA Proc. on Extreme Ultraviolet Lithography. 1995. V. 23. P. 68.
9. Dinger U., Eisert F., Lasser H. et al. // Proc. SPIE. 2000. V. 4146. P. 35.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, ГРФМЛ, 1973. Изд. 2. С. 336.
11. Malacara D., ed. Optical shop testing, 2nd ed., John Wiley&Sons, Inc., ISBN 0-471-52232-5, New York, 1992.
12. Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 1. С. 62; Salaschenko N.N., Toropov M.N., Chkhalo N.I. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2010. V. 74. № 1. P. 53.
13. Sommargren G.E. // Laser Focus World. 1996. V. 8. P. 61.
14. Naulleau P.P., Goldberg K.A., Lee S.H. et al. // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 35. P. 7252.
15. Otaki K., Ota K., Nishiyama I. et al. // J. Vac. Sci. Technol B. 2002. V. 20. № 6. P. 2449.
16. Chkhalo N.I., Dorofeev I.A., Salashchenko N.N., Toropov M.N. // Proc. SPIE. 2008. V. 7025. P. 702507.
17. Chkhalo N.I., Klimov A.Yu., Rogov V.V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. 033107 (5p).
18. Chkhalo N.I., Klunokov E.B., Pestov A.E. et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 7025. P. 702505.
19. Brychikhin M.N., Chkhalo N.I., Eikhorn Ya.O. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. Is. 16. P. 4430.
20. Malyshev I.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N. et al. // Proc. SPIE. 2017. V. 10235. P. 102350C. doi 10.1117/12.2269433
21. Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E. et al. // J. Astron. Telescopes, Instrum., and Syst. V. 4. № 1. 014003-1.
22. Malyshev I.V., Chkhalo N.I., Akhsahalian A.D. et al. // J. Modern Opt. 2017. V. 64. Issue 4. P. 413.
23. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N. et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40. № 2. P. 159.
24. Gavrilin D.A., Kuzin S.V., Salashchenko N.N. et al. // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 31. P. 9315.
25. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Salashchenko N.N. // Opt. Express. 2015. V. 23. № 11. P. 14677.
26. Blunt R. // Proc. CEMANTECH Conference. April 24–27, 2006. Vancouver, Canada. P. 59.
27. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 71; Barysheva M.M., Vainer Yu.A., Gribkov B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2011. V. 75. № 1. P. 67.
28. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016102; <http://dx.org/10.1063/1.4905336>.
29. Kozhevnikov I.V., Pyatakhin M.V. // J. X-ray Sci. and Technol. 2000. № 8. P. 253.
30. Asadchikov V.E., Kozhevnikov I.V., Krivonosov Yu.S. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2004. V. 530. P. 575.
31. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 9. С. 134.
32. Allen L.N., Romig H.W. // Proc. SPIE. 1990. V. 1333. P. 22.
33. Eisenberg N.P., Carouby R., Broder J. // Proc. SPIE. 1988. V. 1038. P. 279.
34. Chkhalo N.I., Klunokov E.B., Pestov A.E. et al. // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A. 2009. V. 603. Issues 1–2. P. 62.
35. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 2. С. 190; Barysheva M. M., Vainer Yu. A., Gribkov B. A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2012. V. 76. № 2. P. 163.
36. Chkhalo N.I., Churin S.A., Mikhaylenko M.S. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 6. P. 1249.

37. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2013. № 7. С. 9.
38. Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. Issue 17. P. 20094.
39. Вайнер Ю.А., Зорина М.В., Пестов А.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 65; Vainer Yu.A., Zorina M.V., Pestov A.E. et al. Salashchenko N.N., Chkhalo N.I., Khramkov R.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2011. V. 75. № 1. P. 61.
40. Зорина М.В., Михайленко М.С., Парьев Д.Е. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2017. № 5. С. 5.
41. Chkhalo N.I., Mikhailenko M.S., Mil'kov A.V. et al. // Surface & Coatings Technology. 2017. V. 311. P. 351.
42. Sidorov D.S., Chkhalo N.I., Mikhailenko M.S. et al. // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B. 2016. V. 387. P.73.
43. Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V. et al. // Precision Engin. 2017. V. 48. P. 338.
44. Волгунов Д.Г., Забродин И.Г., Закалов А.Б. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 54; Volgunov D.G., Zabrodin I.G., Zakalov B.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2011. V. 75. № 1. P. 49.
45. Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 3. P. 619.
46. Chkhalo N.I., Pestov A.E., Salashchenko N.N. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 063701.
47. Нечай А.Н., Пестов А.Е., Полковников В.Н. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 4. С. 347.
48. Ахсахалян А.Д., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2017. № 1. С. 5.
49. Забродин И.Г., Закалов Б.А., Каськов И.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2013. № 7. С. 37.
50. Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.S. et al. // Central Europ. J. Phys. CEJP 1. 2003. P. 191.
51. Bibishkin M.S., Chekhonadskih D.P., Chkhalo N.I. et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5401. P. 8.
52. Гарахин С.А., Забродин И.Г., Зуев С.Ю. и др. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 4. С. 385.
53. Schäfers F., Bischoff P., Eggenstein F. et al. // J. Synchr. Rad. 2016. V. 23. № 1. P.67.
54. Svechnikov M., Pariev D., Nechay A. et al. // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. P. 1428.
55. Drozdov M.N., Drozdov Y.N., Chkhalo N.I. et al. // Thin Solid Films. 2015. V. 577. P. 11.
56. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 17. P. 4683.
57. Chkhalo N., Gusev S., Nechay A. et al. // Opt. Lett. 2017. V. 42. Iss. 24. P. 5070.
58. Chkhalo N.I., Pariev D.E., Polkovnikov V.N. et al. // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 106.
59. Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Fraerman A.A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A. 2005. V. 543. P. 333.
60. Андреев С.С., Барышева М.М., Вайнер Ю.А. и др. // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 3. С. 497.
61. Chkhalo N.I., Künstner S., Polkovnikov V.N. et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 011602.
62. Chkhalo N.I., Nechay A.N., Pariev D.E. et al. Structural and reflective characteristics of Mo/Be multilayer with barrier layers. Physics of X-Ray and Neutron Multilayer Structures Workshop. November 10th-11th 2016. University Twente, the Netherlands.
63. Chkhalo N.I., Gaman D.A., Nechay A.N. et al. // The PTB Seminar VUV and EUV Metrology. Berlin, Germany. 2017.
64. Полковников В.Н., Вайнер Ю.А., Гаман Д.А. и др. // Матер. XXI Междунар. симп. "Нанопфизика и наноэлектроника". Н. Новгород. 2017. Т. 1. С. 428.