15

Методы измерений шероховатостей и их специфика применительно к высокоточным подложкам для рентгеновских зеркал

© Н.И. Чхало,[1] М.М. Барышева,[1,2] Е.И. Глушков,[1] М.В. Зорина,[1] М.С. Михайленко,[1] М.Н. Торопов[1]

[1]Институт физики микроструктур РАН,
603087 Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., Россия
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия
e-mail: chkhalo@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2026 г.
В окончательной редакции 28 мая 2026 г.
Принято к публикации 28 мая 2026 г.

Описаны развитые и применяемые в ИФМ РАН методы измерений шероховатостей высокоточных оптических поверхностей в диапазоне пространственных частот $\sim 1 \cdot 10^{-6} - 10^{2}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$, полностью характеризующие поверхность. Обсуждается специфика применения этих методов для изучения высокоточных сверхгладких подложек для рентгеновской оптики. Сообщается о последних результатах, достигнутых в ИФМ РАН при изготовлении подложек для рентгеновских зеркал из монокристаллического кремния и плавленого кварца.

Ключевые слова: сверхгладкие поверхности, высокоточные подложки, рентгеновская оптика, монокристаллический кремний, плавленый кварц, интерферометр с дифракционной волной сравнения, оптическая профилометрия, атомно-силовая микроскопия, диффузное рассеяние рентгеновского излучения.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63634.195-26

Введение

Малая длина волны рентгеновского излучения накладывает жесткие требования на качество поверхности подложек для рентгеновских зеркал и дифракционных решеток. Как показывают многочисленные исследования, например [1], на разрешающую способность зеркал влияют неровности (шероховатости) всех латеральных размеров от ошибок формы (пространственные частоты $10^{-6} - 10^{-3}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$) до средне- и высокочастотных шероховатостей (диапазон $10^{-3} - 10^{2}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$). В зависимости от рабочей длины волны допустимые величины (СКО) неровностей находятся на уровне $0.2-1$ nm для низкочастотных, и до $0.1-0.2$ nm для средне- и высокочастотных шероховатостей. В свою очередь, подложки могут иметь произвольную форму, в том числе и с большой кривизной. Эти особенности предъявляют дополнительные требования к методам их исследования, используемым на практике — в частности их верификации и доработки.

Из богатого арсенала известных методов изучения шероховатости и формы подложек в рентгеновской оптике прижились лишь некоторые, принципиально обладающие необходимой чувствительностью. Так, к методам изучения шероховатости в диапазоне высоких пространственных частот $5 \cdot 10^{-2} - 10^{2}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ относится атомно-силовая микроскопия (АСМ) [2,3]. Диффузное рассеяние рентгеновского излучения (ДРРИ) перекрывает диапазон средних пространственных частот $5 \cdot 10^{-2} - 10^{1}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ [4,5]. В области средних и низких пространственных частот шероховатостей, $10^{-3} - 0.5\,\mu\mathrm{m}^{-1}$, используется интерферометрия белого света (ИБС) [6,7]. При этом надо отметить, что криволинейные поверхности без существенных доработок могут надежно исследоваться только с использованием ИБС. Применение АСМ предполагает использование специальных измерительных головок и юстировочного оборудования, не производящихся на коммерческой основе.

В литературе упоминается о возможности изучения шероховатости вогнутых подложек методом ДРРИ, используя эффект шепчущей галереи, например, [8]. Однако этот метод носит интегральный характер, а результат зависит от применяемой для анализа модели влияния шероховатости на коэффициент отражения.

Однако и ИБС, и АСМ не относятся к первопринципным и при использовании требуют верификации. Проблеме их достоверности посвящено большое число работ [9,10]. К счастью, при определенных условиях ДРРИ можно отнести к первопринципным, тем самым, рассматривая его в качестве эталона измерений. Другим фактором, позволяющим верифицировать точность измерений АСМ и ИБС с помощью ДРРИ, является то, что значительная часть коротковолновой области ИБС и длинноволновой АСМ, перекрываясь между собой, пересекаются с рабочим диапазоном ДРРИ. Таким образом, идея верификации методов АСМ и ИБС заключается в совпадении кривых спектральной плотности мощности шероховатостей, измеренных этими методами между собой и с ДРРИ в области пересечения рабочих диапазонов. Такая верификация с использованием синхротрона КИСИ недавно была проведена, было показано, что даже для подложки с эффективной шероховатостью 0.8 nm

функции спектральной плотности мощности шероховатости (Power Spectral Density, PSD функции), измеренные тремя вышеупомянутыми методами, хорошо совпали в области пересечения их рабочих диапазонов [11].

Для изучения сверхнизкочастотных шероховатостей или формы поверхности подложек (частоты $10^{-6}-10^{-3}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$) используется высококогерентная интерферометрия, чаще всего — интерферометры Физо с эталонной поверхностью [12,13]. Наличие эталона автоматически предполагает необходимость оценки влияния ошибок эталонов на результаты измерений, для чего используются самые различные методы, описанные, например, в [14–16]. В своих работах мы используем альтернативный подход — безэталонную интерферометрию: волна сравнения формируется за счет дифракции видимого света на выходе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой [17].

В настоящей работе приводится описание стендов, используемых в ИФМ РАН для измерений шероховатости поверхности подложек для рентгеновских зеркал в диапазоне пространственных частот $\sim 10^{-6}-10^{2}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$, и обсуждается специфика их применения. Дается описание методики восстановления PSD-функций шероховатостей поверхностей с произвольной формой. Приводятся последние результаты по определению точности формы и шероховатости подложек для элементов рентгеновской оптики, достигнутые авторами и характеризующие современный уровень развития этой области в РФ.

1. Описание стендов для измерений шероховатости и формы поверхности зеркал и специфика их применения для исследования высокоточных атомарно гладких подложек.

1.1. Стенд на основе АСМ

Спецификой применения АСМ для изучения шероховатости подложек для рентгеновской оптики является их кривизна, в некоторых случаях числовая апертура (Numerical Aperture, NA) деталей достигает значений $\mathrm{NA} \approx 0.4-0.5$. Это накладывает ряд дополнительных требований на использование АСМ, которые не учитываются в серийных приборах. В частности, как отмечалось ранее [10], для обеспечения высокой точности и сохранения максимально широкого диапазона измерений в латеральной плоскости, в каждой точке локальная нормаль к исследуемой поверхности должна быть сориентирована по оси зонда. Поскольку диапазон линейного перемещения зонда типичных для АСМ трубчатых сканнеров в вертикальной плоскости (z) составляет около $1\,\mu\mathrm{m}$, в случае наклона поверхности по отношению к зонду латеральный размер измеряемого кадра (x, y) сократится, тем самым снизится диапазон измеряемых пространственных частот. Для решения этой проблемы столик, на котором устанавливается исследуемый образец, должен обеспечивать наклоны вокруг осей X и Y. Диапазон наклонов должен быть не менее максимального наклона касательной к поверхности детали на ее периферии.

В случае исследований вогнутых деталей кантилевер может не достигать поверхности из-за помех, связанных с латеральными размерами измерительной головки. В серийных конструкциях АСМ, представленных на рынке, как правило, измерительные головки рассчитаны на измерения плоских образцов небольших размеров.

Другим важным фактором при исследовании сверхгладких подложек является шум прибора. Помимо внутренних причин, чаще всего тепловых, на шум измерений влияют внешние вибрации и акустический шум.

В ИФМ РАН для исследований подложек используется специальный стенд, фотография которого приведена на рис. 1, *a*. Стенд создан на основе атомно-силового микроскопа Ntegra Prima (компания НТ-МДТ, Зеленоград). При измерении шероховатости использовались зонды NSG10 фирмы TipsNano с радиусом кривизны кончика зонда 10 nm. Для минимизации влияния внешних вибрация на результаты измерений в стенде предусмотрено несколько степеней виброзащиты. Первая — основание измерительной части *1* устанавливается на виброизолирующем пневматическом столе *2*, который, в свою очередь, установлен на изолированном от здания фундаменте. Измерительная часть состоит из координатного стола *3*, исследуемого образца *4* и измерительной головки *5*, подвешенной на резиновых жгутах *6*.

Ручной шестикоординатный столик позволяет подвести любую точку детали к зонду АСМ и выровнять локальную нормаль в диапазоне углов $\pm 4^\circ$. В случае недостаточности наклона столика под деталь может быть подложен клин.

Для исследования вогнутых деталей с большой числовой апертурой в НТ-МДТ по специальному заказу была разработана измерительная головка с увеличенным расстоянием от базы головки до кончика зонда. Также нами был модифицирован крепеж головки сверху, что позволяет не ограничиваться в латеральных размерах измеряемых образцов. На рис. 1, *b*, *c* приведены фотографии фрагментов стандартной и специальной измерительных головок в области зонда. Как видно на рис. 1, *b*, стандартная головка ориентирована на измерения плоских деталей, в то время как специальная головка (рис. 1, *c*) позволяет измерять вогнутые детали с числовой апертурой до $\mathrm{NA} = 0.6$.

Для снятия заряда с поверхности в лаборатории предусмотрен контроль влажности воздуха. Для подавления акустических шумов стенд помещается в изолированной от оператора и управляющего компьютера отдельной комнате.

Помимо максимальной числовой апертуры исследуемых вогнутых деталей метод имеет ряд других ограничений. Во-первых, частотный диапазон. Со стороны высоких частот измерения ограничены радиусом закругления кончика зонда, который составляет 10 nm. Поэтому мы

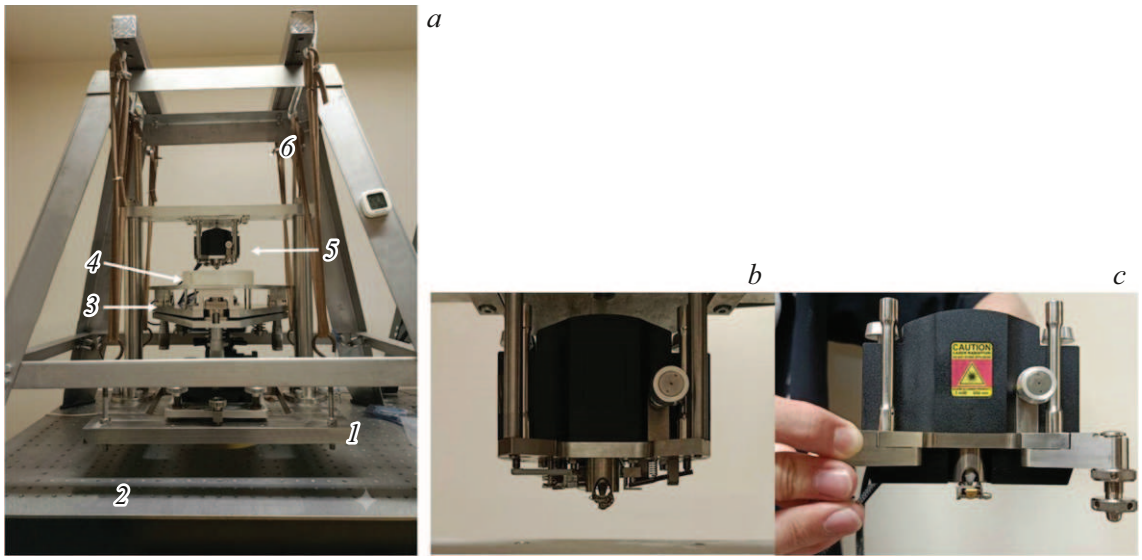

Рис. 1. Фотография стенда на основе АСМ для измерений шероховатости в диапазоне пространственных частот $0.025-65\,\mu\mathrm{m}^{-1}$. Основные элементы ($a$), фрагменты стандартной (b) и специальной (c) измерительных головок в области зонда.

ограничиваем диапазон измерений частотой $65\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ (1.5 радиуса зонда). Граница достаточно условная, однако ее сдвиг в ту или иную сторону не повлияет на величину измеряемой эффективной шероховатости.

Со стороны низких пространственных частот, не смотря на декларируемые производителем максимальные размеры кадров до $120\,\mu\mathrm{m}$ (частота $8\cdot10^{-3}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$), основным ограничивающим фактором является нелинейность пьезосканнера. Пример влияния этого эффекта на регистрируемый профиль поверхности атомарно гладкой поверхности приведен на рис. 2. На рисунке четко видны вертикальные полосы, ориентация которых определяется направлением сканирования. Эти артефакты АСМ измерений определяются нелинейностью пьезосканнера 3-го порядка. Скорректированные с учетом вычета нелинейности 3-го порядка профили поверхности подложки и PSD-функции приведены на рис. 2, b, c (нижняя кривая). При этом измеренная шероховатость по кадру $40\times40\,\mu\mathrm{m}$ снизилась с 0.36 до 0.13 nm. Таким образом, мы считаем, что достоверно измеряемой с помощью АСМ минимальной пространственной частотой является $0.025\,\mu\mathrm{m}^{-1}$.

Следующим фактором, ограничивающим точность измерений эффективной шероховатости, являются собственные шумы прибора. Так как мы используем формализм функций спектральной плотности мощности шероховатостей $\mathrm{PSD}(\nu)$, где ν — пространственная частота, в рамках этого формализма измеренная величина эффективной шероховатости определяется как

$$\sigma_{\mathrm{eff}}^2=\int\limits_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}}\mathrm{PSD}(\nu)d\upsilon. \qquad (1)$$

Можно представить PSD-функцию поверхности как сумму двух компонент, первая из которых, PSDsub, отражает реальные свойства поверхности, а вторая, PSDnoise, определяется шумом АСМ-сканера:

$$\mathrm{PSD}(\nu)=\mathrm{PSD}_{sub}(\nu)+\mathrm{PSD}_{noise}(\nu), \qquad (2)$$

и ввести „эффективную шероховатость шума“ по аналогии с (1):

$$\sigma_{\mathrm{eff_}noise}^2=\int\limits_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}}\mathrm{PSD}_{noise}(\nu)d\upsilon. \qquad (3)$$

Определение „эффективной шероховатости шума“ осуществлялось следующим образом. Брался образец с низкой шероховатостью и запускалась процедура квазисканирования: сканер неподвижен, но производится измерения амплитуды колебаний зонда как при реальном сканировании. На рис. 3 приведены PSD-функции измеренного образца *1*, шума *3* и образца с вычтенным шумом *2*, измеренные по кадрам 2×2 и $40\times40\,\mu\mathrm{m}$. Восстановленная по этим данным „эффективная шероховатость шума“ в диапазоне пространственных частот $0.025-65\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ составила $\sigma_{noise}=0.07\,\mathrm{nm}$. Учет шума скорректировал эффективную шероховатость подложки с 0.19 до 0.17 nm. Таким образом, этот пример иллюстрирует, что для изучения подложек с шероховатостью менее 0.2 nm, требуемых для рентгенооптических применений, фактор шума АСМ необходимо учитывать обязательно.

Методика восстановления PSD-функций по АСМ изображениям поверхности нами подробно описана, например, в [11].

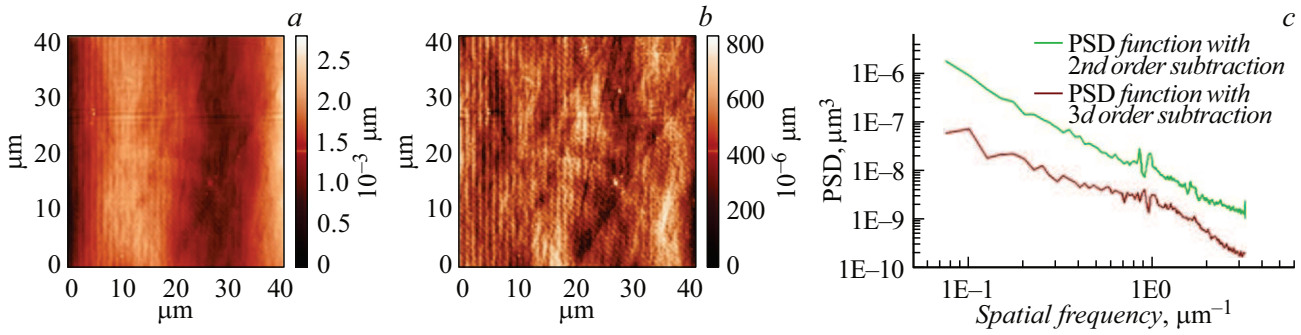

Рис. 2. Регистрируемый с помощью АСМ профиль атомарно гладкой поверхности. Размер кадра $40 \times 40\,\mu$m.

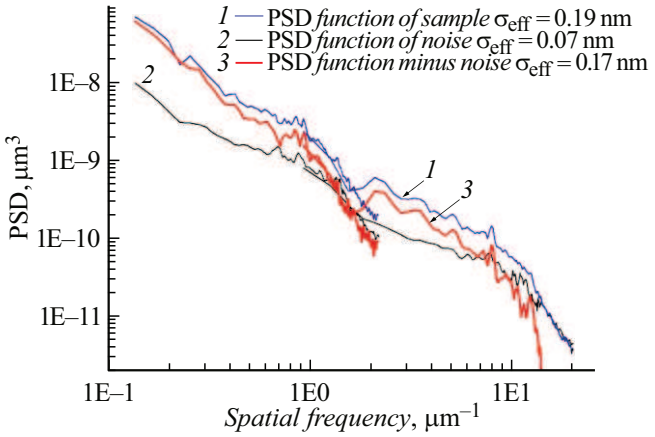

Рис. 3. PSD-функции измеренного образца (*1*), шума (*3*) и образца с вычтенным шумом (*2*), измеренные по кадрам 2×2 и $40 \times 40\,\mu$m.

1.2. Стенд на основе ИБС

ИБС широко применяется для измерения шероховатости как в лабораториях, так и в индустрии, благодаря высокой (субангстремного уровня) чувствительности, бесконтактности и возможности быстрого сканирования больших площадей. Так, благодаря бесконтактности с помощью стандартных ИБС можно исследовать не только плоские, но и криволинейные поверхности. Метод измерения 3*D*-профиля поверхности основан на анализе интерференционной картины, возникающей при взаимодействии световых пучков от опорного и измерительного плеч интерферометра. В случае ИБС свет широкополосного источника излучения с длиной когерентности $1-5\,\mu$m разделяется на два пучка: первый отражается от эталонного зеркала (опорный луч), а второй — от исследуемой поверхности (измерительный луч). Интерференция возникает только при совпадении оптических путей с точностью до длины когерентности источника. Для получения трехмерного профиля поверхности выполняется вертикальное сканирование, в ходе которого регистрируется положение максимума огибающей интерференционной картины для каждой точки изображения. Последующая обработка данных позволяет построить карту высот с суб-ангстремным разрешением.

Как и в случае АСМ, основными факторами, влияющими на точность измерений, являются вибрации и акустический шум, шум регистрирующей матрицы. В латеральном направлении со стороны высоких пространственных частот диапазон ограничен оптическим разрешением объектива, порядка длины волны. Со стороны низких частот — диаметром используемых объективов. Также следует отметить, что с расширением поля зрения на результаты измерений негативное влияние могут оказать слабо контролируемые аберрации эталона и объектива. Наша и мировая практика показала, что этот тип измерителя шероховатости хорошо работает в диапазоне пространственных частот $10^{-3}-1\,\mu\text{m}^{-1}$.

Главной проблемой, с которой столкнулась ИБС применительно к изучению атомарно гладких поверхностей, является отсутствие возможности адекватной оценки собственных шумов прибора, качества эталонов и объективов. В ранних работах отмечалось, что надежные измерения шероховатости с помощью ИБС достигались только для относительно шероховатых подложек с эффективной шероховатостью от ~ 1 nm и более. На неадекватность измерений указывал, в частности, такой факт: при смене объектива интерферометра PSD-функции в области пересечения рабочих диапазонов объективов должны совпадать, в действительности же в ряде случаев наблюдалось пересечение, а не совпадение PSD-функций [10]. Поэтому применимость конкретного прибора для изучения шероховатости рентгенооптических элементов должна быть внимательно изучена.

Для этой цели мы используем два критерия достоверности. Первый — это описанный выше анализ PSD-функций шероховатости атомарно гладкой поверхности, полученных с помощью различных объективов ИБС. Второй — сравнение PSD-функций, измеренных с помощью АСМ, ДРРИ и ИБС. Причем для валидации в низких частотах $\sim 10^{-3}\,\mu\text{m}^{-1}$ подходит только ДРРИ с использованием синхротронного излучения.

В нашей лаборатории для этих целей используется ИБС SuperView W1 (Chotest Technology Inc, Китай) [18].

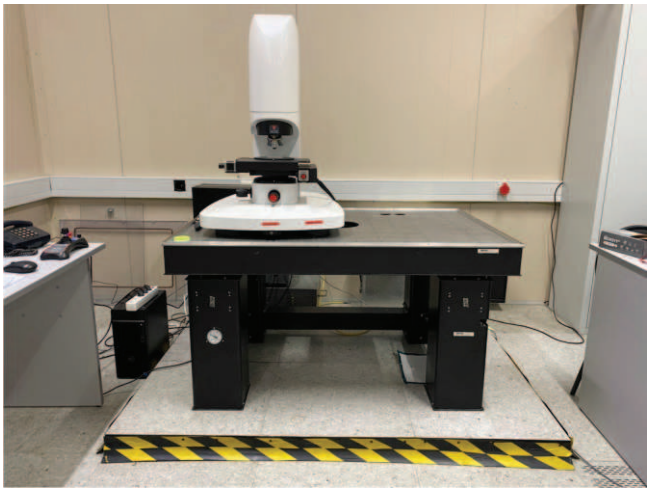

Рис. 4. Фотография стенда на базе интерферометра белого света SuperView W1 (Chotest Technology Inc, Китай) [20].

Фотография прибора приведена на рис. 4. Для минимизации вибраций прибор установлен на виброизолирующем пневматическом столе. Диапазон перемещений образца в горизонтальной плоскости составляет 140×100 mm. Диапазон грубого перемещения по вертикали составляет 100 mm, точного — 2.1 mm с шагом менее 0.1 nm. Прибор позволяет измерять поверхности любых типов и определять радиусы кривизны в двух направлениях, начиная с $R = 1$ mm до бесконечности. Образцы могут иметь коэффициенты отражения от поверхности в широких пределах от 0.05 % до 100 %. Программное обеспечение прибора позволяет проводить измерения с различными объективами: $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$ и $\times 50$ и соответственно с различными полями зрения: 1960×1960, 980×980, 480×480 и $196 \times 196\,\mu$m.

Процедура проведения измерений подробно описана в [12]. Отметим здесь только аспекты, связанные с чувствительностью и адекватностью измерений с помощью этого интерферометра.

Первым шагом стало изучение воспроизводимости результатов измерений. Методом последовательных приближений было определено оптимальное количество усреднений кадров, позволяющее эффективно подавлять шумовые составляющие без существенного увеличения времени измерений. Анализ показал, что усреднение по 10 кадрам обеспечивает оптимальное соотношение между воспроизводимостью результатов и временем проведения измерений. В таблице представлены значения СКО серии измерений одной и той же области на образце для объективов с разным увеличением. В таблице видно, что во всех случаях, за исключением объектива $\times 50$, достигается субангстремная воспроизводимость измеренной шероховатости.

Вторым шагом стал анализ PSD-функций поверхности, измеренных с помощью разных объективов на ИБС одной и той же области образца. На рис. 5

Значения СКО серии измерений одной и той же области на образце для объективов с разным увеличением

Объектив	СКО, nm
$\times 5$	0.07
$\times 10$	0.06
$\times 20$	0.03
$\times 50$	0.16

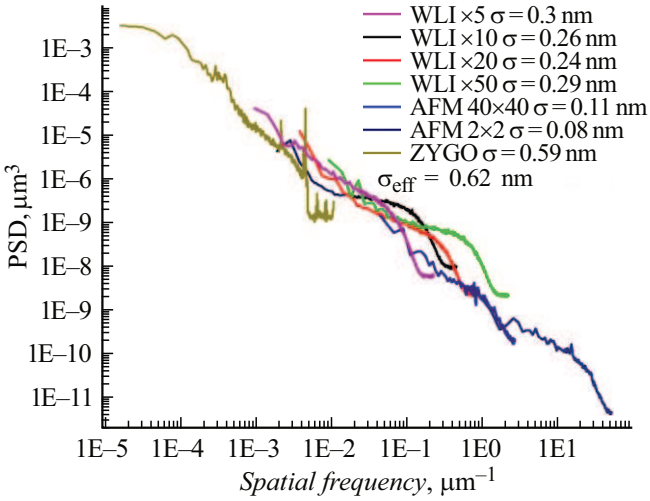

Рис. 5. PSD-функции шероховатости подложки из плавленого кварца, измеренные с помощь ИБС: $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$ и с помощью АСМ, кадры 40×40 и $2 \times 2\,\mu$m, а также измерениям на высококогерентном интерферометре Zygo.

приведены результаты измерений (без предварительной обработки экспериментальных данных) подложки из плавленого кварца. Так же на рисунке добавлены PSD-функции шероховатости, измеренные с помощью АСМ, кадры 40×40 и $2 \times 2\,\mu$m, и высококогерентного интерферометра Zygo. Из приведенного рисунка можно сделать следующие выводы. Во-первых, трудно говорить о совпадении PSD-функций, измеренных с различными объективами, в области пересечения их рабочих диапазонов. Скорее можно говорить о пересечении кривых. Во-вторых, по сравнению с АСМ и высококогерентным интерферометром данные явно завышены. Этот эффект был мал в нашей предыдущей работе [11]. Однако в той работе исследовалась подложка с эффективной шероховатостью в диапазоне пространственных частот $1.5 \cdot 10^{-3} - 65\,\mu\text{m}^{-1}$ $\sigma_{\text{eff}} = 0.8$ nm, в то время, как в нашем случае в этом диапазоне $\sigma_{\text{eff}} \approx 0.3$ nm. Отсюда следует, что для очень гладких поверхностей, требуемых для рентгеновской оптики, ИБС не является адекватным инструментом для измерений шероховатости.

Тем не менее благодаря высокой чувствительности по высоте, достаточно широкому диапазону наблюдае-

мых пространственных частот поверхности, скорости и простоте проведения измерений этот прибор незаменим при производстве подложек и зеркал для рентгеновской оптики. В тандеме с атомно-силовым микроскопом они позволяют обнаруживать дефекты поверхности (загрязнения) всех латеральных масштабов.

В целом, следует отметить, что измерения с помощью ИБС других подложек с близкой величиной шероховатости демонстрирует аналогичное поведение.

1.3. Стенд на основе фазосдвигающего интерферометра Физо

Высококогерентная интерферометрия Физо широко применяется для исследования формы поверхности рентгенооптических элементов разных типов: плоские, криволинейные, сферические, асферические. Интерференционная картина получается при сложении волновых фронтов, отраженных от эталонной поверхности интерферометра и исследуемой поверхности детали.

Основным преимуществом интерферометра Физо над профилометрами является его большое поле зрения. Наиболее коммерчески распространенными являются эталоны диаметрами 4 и 6 дюймов с точностью формы по параметру максимального размаха высот $\lambda/20$.

В нашей лаборатории используется интерферометр Физо Zygo Verifire ($\lambda = 632.8$ nm) с апертурой 4 дюйма. Матрица детектора имеет размер 1200×1200 пикселей. Интерферометр позволяет проводить измерения с увеличением до $\times 5$. Таким образом, интерферометр позволяет характеризовать форму поверхности с пиксельным разрешением от 100 до 20 μm.

На рис. 6 представлен наш измерительный стенд на базе интерферометра Физо. Исследуемая поверхность устанавливается на систему из трех подвижек (Standa, Литва), позволяющих осуществлять перемещение детали вдоль апертуры интерферометра и ее ориентации параллельно эталонной поверхности для минимизации ошибок измерений. Линейное X-перемещение осуществляется подвижкой 8MT160-300 с диапазоном перемещения 300 mm и минимальной величиной шага 2.5 μm. Наклонные ϑ_Y и ϑ_X перемещения осуществляются подвижками 8MR151 и 8MG00V-80, которые работают в микрошаговом режиме 1:16 для достижения минимальной величины углового перемещения до 10 μrad.

Для данной системы был разработан алгоритм измерений с обратной связью по интерферограмме, который ориентирует деталь параллельно эталонной поверхности и позволяет проводить измерения в полностью автоматическом режиме.

На результат измерений интерферометра Физо влияют случайные и систематические ошибки измерений. Основными источниками случайных ошибок являются вибрации и воздушные потоки. Для минимизации влияния вибраций прибор и исследуемая поверхность устанавливаются на виброизолирующем пневматическом столе, который установлен на фундаменте здания. Для

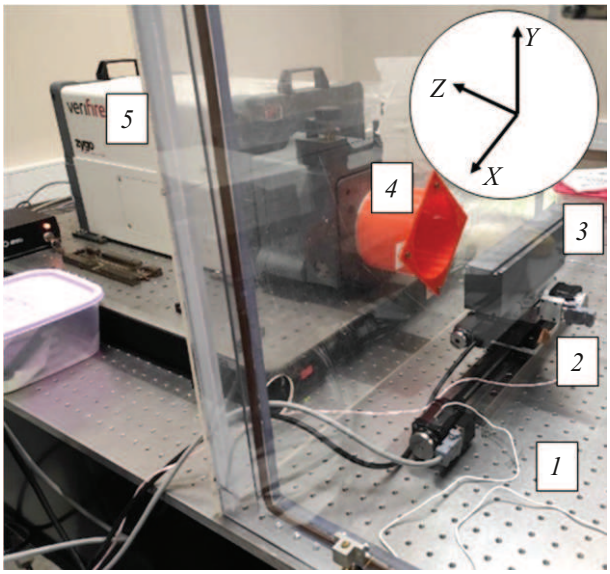

Рис. 6. Фотография стенда на основе интерферометра Физо для измерений формы поверхности. Основные элементы: виброизолирующий пневматический стол (*1*); 3-х координатная система перемещения (*2*); исследуемый образец (*3*); защитный экран (*4*); интерферометр Физо (*5*).

минимизации влияния воздушных потоков, которые, в частности, обусловлены нагревающимися элементами в измерительной системе (лазер и электроника интерферометра, шаговые двигатели), исследуемая деталь устанавливается в изолирующем коробе, а интерферометр находится вне его. Область между эталоном интерферометра и коробом дополнительно изолирована защитным экраном. Ряд измерительных техник (измерение крупногабаритных и криволинейных деталей методом сшивки, определение систематических ошибок методом сдвига) предполагает перемещение детали на моторизованных подвижках, для которых были подобраны режимы работы таким образом, чтобы минимизировать нагрев моторов и исключить их вибрации в процессе измерений благодаря снятию тока удержания с шаговых двигателей в конце перемещения. Описанные приемы позволили нам достигнуть субангстремной повторяемости однократных измерений, равной 0.015 nm по СКО, и субнанометрового пиксельного шума со средним значением 0.38 nm.

К источникам систематических ошибок измерений можно отнести эталонную поверхность интерферометра и пыль в оптической системе интерферометра, которая приводит к возникновению дифракционных колец на восстановленной фазе. Для минимизации систематических ошибок измерений нами применяется метод сдвига исследуемой детали вдоль апертуры интерферометра. Методика заключается в измерении перекрывающихся участков исследуемой оптической поверхности с последующим использованием значений восстановленной фазы для составления и решения переопределенной системы линейных уравнений.

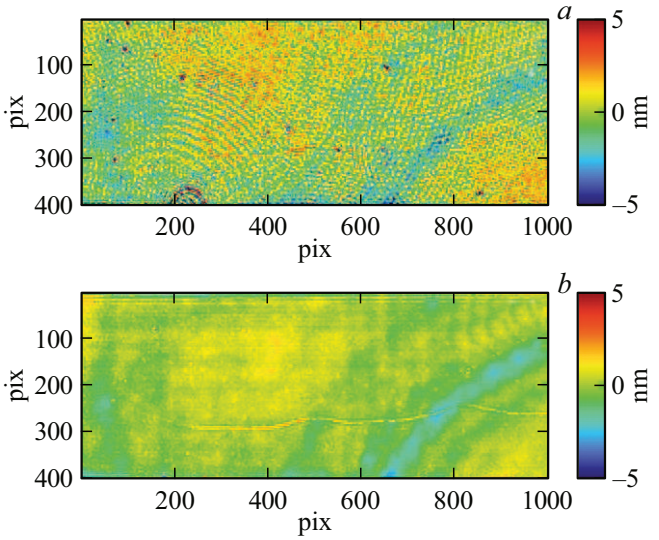

Рис. 7. Результаты измерений: *a* — без учета систематической ошибки; *b* — с учетом систематической ошибки. Параметры поверхности: *a* — СКО = 1.55 nm, Peak-to-Valley (PV) = 20.45 nm; *b* — СКО = 0.621 nm, PV = 16.14 nm.

На рис. 7, *a* представлен типичный результат измерения плоской поверхности. На нем отчетливо видны кольцевые структуры, возникшие из-за дифракции на дефектах в оптической системе интерферометра. На рис. 7, *b* представлен результат того же самого участка поверхности, но с учетом систематической ошибки по описанной выше методике. Видно, что кольцевые структуры перестали отчетливо наблюдаться.

Таким образом, разработанные нами методики учета систематических ошибок интерферометра позволяют исследовать низкочастотные шероховатости (ошибки формы) поверхности в диапазоне 10^{-6}–$10^{-3}\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ с субнанометровой абсолютной точностью и суб-ангстремной повторяемостью.

1.4. Стенд на основе безэталонной интерферометрии с дифракционной волной сравнения

Одной из ключевых проблем интерферометров Физо является наличие эталонных поверхностей, формирующих опорную волну сравнения. Строго говоря, результатом измерений с помощью такого интерферометра является не форма поверхности исследуемой детали, а отличие формы поверхности детали от эталона. В предыдущем параграфе отмечалось, что развит ряд методик, позволяющих произвести оценку ошибок, вносимых эталоном. Наиболее точным методом является метод сдвига, который используется с плоским эталоном [15].

В случае сферического эталона этот метод теряет свою надежность и фактически остается только методы двух поверхностей и вращения детали вокруг своей оси, а также их комбинация [19,20]. Серьезным недостатком этих методов является риск ошибки определения осесимметричных аберраций эталона, так как они не зависят от поворота детали. При этом необходимо отметить, что для высокоточных оптических деталей (в данном случае эталон интерферометра) такие ошибки являются наиболее вероятными.

Для решения этой проблемы мы используем безэталонную интерферометрию с дифракционной волной сравнения (ИДВС). Главным отличием этого типа интерферометра от Физо является „идеальность“ эталонного сферического фронта, генерируемого на выходе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой. Проверка аберраций сферической волны этого источника осуществляется методом Юнга по интерференции от двух аналогичных источников. Как было показано в ряде работ, аберрации волнового фронта составляют менее 1 Å в широкой угловой апертуре [21]. Частотный диапазон интерферометрических измерений контролируется соответствующим подбором числа полиномов Цернике, участвующих в аппроксимации результатов измерений [22].

В вакуумном исполнении этот интерферометр решает и проблему „тепловых“ линз в воздухе, негативно влияющих на точность измерений. Фотографии интерферометров в воздушном и вакуумном исполнении приведены на рис. 8.

Пример оценки осесимметричных ошибок ИДВС (систематическая ошибка измерений) приведен на рис. 9. На рис. 9, *a* приведена наблюдаемая интерферограмма, на рис. 9, *b* — восстановленная по интерферограмме карта аберраций, а на рис. 9, *c* — только осесимметричная часть аберраций, которая не может быть определена методом поворота детали. Числовая апертура регистрирующей системы NA = 0.28.

Измеренная карта аберраций (рис. 9, *b*) СКО = 1.1 nm, перепад высот PV = 7 nm, а также осесимметричная составляющая аберраций (рис. 9, *c*) СКО = 0.2 nm, перепад высот PV = 0.6 nm, главным образом, определяются аберрациями и загрязнениями элементов оптической части регистрирующей системы. Таким образом, среднеквадратическое отклонение осесимметричных ошибок

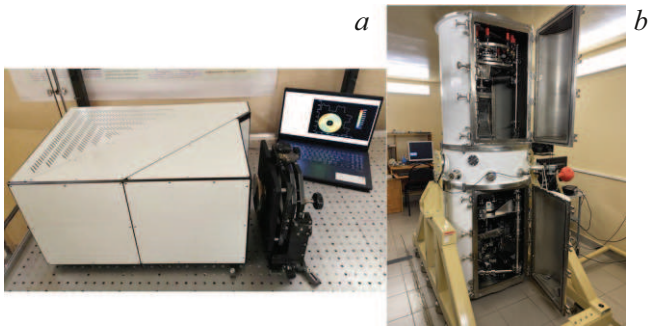

Рис. 8. Фотографии интерферометров с дифракционной волной сравнения в воздушном (*a*) и вакуумном (*b*) исполнении.

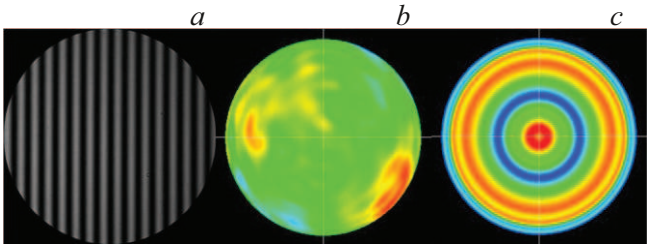

Рис. 9. Измеренная с помощью „воздушного“ ИДВС интерферограмма (a), восстановленные по ней аберрации волнового фронта (СКО = 1.1 nm, перепад высот PV = 7 nm) (b) и осесимметричная составляющая аберраций (СКО = 0.2 nm, перепад высот PV = 0.6 nm) (c). Числовая апертура регистрации NA = 0.28.

ИДВС составило СКО = 0.2 nm, что существенно меньше ошибок любых эталонов. Таким образом, ИДВС можно рассматривать в качестве надежного прибора для калибровки эталонов Физо интерферометров. Важно отметить, что параметры осесимметричной аберрации практически не зависят от числа полиномов Цернике, используемых для аппроксимации аберраций, что говорит о низкочастотном характере этих ошибок.

2. Обсуждение результатов и основные выводы

В настоящей работе дан обзор основных методов и подходов, развиваемых авторами около двух десятков лет, и обеспечивающих полную характеризацию поверхности подложек и конечных изделий (зеркал, кристаллов, дифракционных решеток) для рентгеновской оптики. Под термином „полная“понимается измерение неровностей (шероховатостей) всех латеральных масштабов, от диаметра исследуемой детали до 10 нанометров с ангстремной, а в высокочастотной части субангстремной чувствительностью. Обсуждается специфика применения стандартных методов к решению данной задачи, которая вытекает из возросших по сравнению с оптическим диапазоном требований к шероховатости и точности формы.

На рис. 10 приведен пример такого анализа для плоской кварцевой подложки с размерами $60 \times 25 \times 25$ mm. Интегральная шероховатость во всем диапазоне пространственных частот составила 0.88 nm, что удовлетворяет требованиям к рентгеновской оптике дифракционного качества нормального падения для большинства приложений: критерий Марешаля для LSFR-шероховатости СКО $\leq \lambda/14$ [23] выполняется для длин волн до 8 nm. На практике для большинства задач достаточно $\lambda/4$–$\lambda/8$, т. е. коротковолновая граница находится на уровне 2.3–4.6 nm, что перекрывает востребованные микроскопические приложения в спектральных областях окон прозрачности воды и углерода. Также этого уровня изготовления подложек достаточно практически

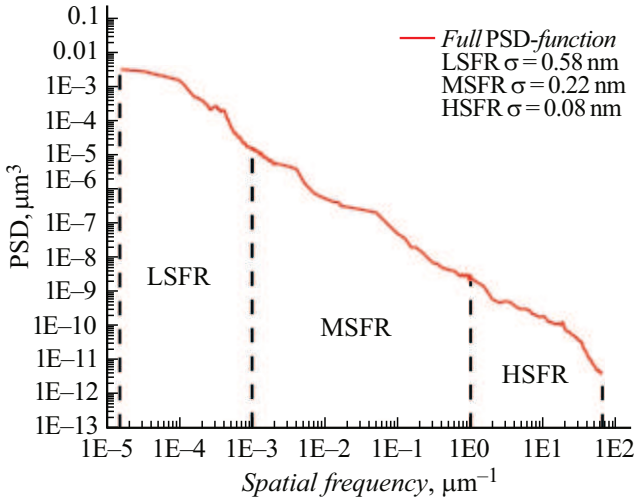

Рис. 10. Полная PSD-функция кварцевой подложки, построенная по данным высококогерентной интерферометрии (LSFR-шероховатости), атомно-силовой микроскопии (MSFR и HSFR — шероховатости) и в узком спектральном диапазоне MSFR 0.0010.025 μm^{-1} с помощью ИБС (1 точка с объективом $\times 5$ и остальные с $\times 10$).

для всех рентгеновских приложений, включая жесткий диапазон энергий фотонов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-20108-П: изготовление экспериментальных образцов, измерения с помощью высококогерентной интерферометрии и атомно-силовой микроскопии. Измерения на ИБС и построение интегральных PSD-функций выполнены при поддержке гранта РНФ № 25-72-00043.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] U. Dinger, F. Eisert, H. Lasser, M. Mayer, A. Seifert, G. Seitz, S. Stacklies, F.-J. Stickel, M. Weiser. Proc. SPIE, **4146**, 35 (2000). DOI: 10.1117/12.406674

[2] J.E. Griffith, D.A. Grigg. J. Appl. Phys., **74**, R83 (1993). DOI: 10.1063/1.354175

[3] C. Teichert, J.F. MacKay, D.E. Savage, M.G. Lagally, M. Brohl, P. Wagner. Appl. Phys. Lett., **66** (18), 2346 (1995). DOI: 10.1063/1.113978

[4] I.V. Kozhevnikov, M.V. Pyatakhin. J. X-ray Sci. Technol., **8** (4), 253 (2000). DOI: 10.3233/XST-2000-8403

[5] V.E. Asadchikov, I.V. Kozhevnikov, Yu.S. Krivonosov, R. Mercier, T.H. Metzger, C. Morawe, E. Ziegler. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **530**, 575 (2004). DOI: 10.1016/j.nima.2004.04.216

[6] V.V. Azarova, V.G. Dmitriev, Yu.N. Lokhov, K.N. Malitskii. J. Opt. Technol., **69** (2), 125 (2002). DOI: 10.1364/JOT.69.000125
[7] S. Iles, J. Nelson. In: Optifab 2019, Proc. SPIE, **11175**, 246 (2019). DOI: 10.1117/12.2536683
[8] I.V. Yakimchuk, B.S. Roshchin, I.V. Kozhevnikov, V.E. Asadchikov, Zh. Wang. Crystallogr. Rep., **53** (6), 1054 (2008). DOI: 10.1134/S1063774508060229
[9] J. Chen, T. Sun, J. Wang. In: 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, Proc. SPIE, **7656**, 583 (2010). DOI: 10.1117/12.863268
[10] М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салащенко, И.Л. Струля, Н.И. Чхало. Изв. РАН. Сер. физ., **75** (1), 71 (2011). [M.M. Barysheva, Yu.A. Vainer, B.A. Gribkov, M.V. Zorina, A.E. Pestov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, I.L. Strulya, N.I. Chkhalo. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **75** (1), 67 (2011).] DOI: 10.3103/S106287381101005
[11] М.М. Барышева, Н.И. Чхало, Ю.А. Вайнер, М.В. Зорина, М.С. Михайленко, Р.М. Смертин. ЖТФ, **95** (10), 1887 (2025).
[12] D. Malacara. *Optical shop testing*, 2nd ed. (John Wiley&Sons, NY., 1992), ISBN 0-471-52232-5
[13] *Verifire*™ *Laser Interferometers. Zygo Corporation.* URL: https://www.zygo.com/products/metrology-systems/laser-interferometers/verifire
[14] I. Powell, E. Goulet. Appl. Opt., **37** (13), 2579 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.002579
[15] P.B. Keenan. SPIE, **429**, 2 (1983). DOI: 10.1117/12.936333
[16] B.S. Fritz. Opt. Eng., **23** (4), 379 (1984). DOI: 10.1117/12.7973304
[17] A.A. Akhsakhalyan, N.I. Chkhalo, N. Kumar, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, B.A. Ulasevich, S.V. Kuzin. Precis. Eng., **72**, 330 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.05.011
[18] *CHOTEST Group. White Light Interferometer.* URL: https://en.chotest.com/detail.aspx?cid=823
[19] J. Burke, D.S. Wu. Appl. Opt., **49** (31), 6014 (2010). DOI: 10.1364/AO.49.006014
[20] X. Hou, P. Yang, F. Wu, Y. Wan. Opt. Lasers Eng., **49** (7), 833 (2011). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.03.002
[21] Н.И. Чхало, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов. УФН, **190** (1), 74 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2019.05.038601
[22] M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, M.N. Toropov, N.N. Salashchenko. Opt. Express, **23** (11), 14677 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.014677
[23] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1970)