

Получение гладких высокоточных поверхностей методом механического притира

© М.Н. Торопов,¹ А.А. Ахсаханян,¹ М.В. Зорина,¹ Н.Н. Салащенко,¹ Н.И. Чхало,^{1,¶} Ю.М. Токунов²

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

² Московский физико-технический институт (МИФИ)
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

¶ e-mail: chkhalo@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2020 г.

Принято к публикации 12 апреля 2020 г.

Подробно описана методика получения высокоточных гладких сферических подложек с использованием механического притира и применяемая для этих целей метрология. Приведена модифицированная схема двухзондового интерферометра с дифракционной волной сравнения, обеспечивающая выравнивание интенсивности в плечах интерферометра и перестройку рабочей апертуры без перенастройки прибора. Представлены экспериментальные результаты, полученные при доводке с использованием этой методики вогнутой сферической подложки из плавленного кварца с числовой апертурой $NA = 0.30$, изготовленной традиционным методом глубокой шлифовки–полировки. Исходные характеристики подложки: точность формы по параметру $SKO = 36 \text{ nm}$ ($\sim \lambda/20$), эффективной шероховатостью в диапазоне пространственных частот $0.025\text{--}65 \mu\text{m}^{-1}$ $\sigma_{\text{eff}} = 1.1 \text{ nm}$. После доводки подложки параметры поверхности улучшились до значений: $SKO = 3.3 \text{ nm}$ ($\sim \lambda/200$) и $\sigma_{\text{eff}} = 0.26 \text{ nm}$. Исследовано влияние размера зерна в суспензии на шероховатость и форму подложки.

Ключевые слова: притир, шлифовка–полировка, шероховатость, сферическая подложка.

DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49990.127-20

Введение

В связи с активным освоением экстремального ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов длин волн, востребованных в таких областях, как проекционная нанолитография на длине волны 13.5 nm [1–4], изучение короны Солнца [5–9], микроскопия в спектральной области „окна прозрачности воды“ [10–14], синхротронные исследования [15,16], появилась необходимость в создании оптики нового поколения с точностью формы на субнанометровом, а шероховатостью — на ангстремном уровне. Эти требования на один–два порядка выше, чем требования, предъявляемые к традиционной оптике. Проблема осложняется еще и тем, что требуются асферические поверхности.

Общеизвестно, что при шлифовке–полировке плоских и сферических поверхностей, благодаря взаимному притиру, достигается наилучшее качество обработки оптических поверхностей [17]. При изготовлении асферических поверхностей притир невозможен, а требуемая форма поверхности достигается за счет обработки малоразмерным инструментом. Отсутствие притира приводит к появлению локальных ошибок формы и шероховатостей, лежащих в диапазоне средних пространственных частот ($10^{-3}\text{--}1 \mu\text{m}^{-1}$). Поэтому при изготовлении высокоточных асферических поверхностей мы развиваем следующий подход. Первоначально методом притира изготавливаются сферические (плоские)

подложки с радиусом кривизны, наиболее близким к требуемой асферике. Затем с использованием специально разработанной установки ионно-пучкового травления [18] проводятся коррекция локальных ошибок и асферизация формы [19,20]. Для этих целей исходными являются подложки–заготовки, представленные на рынке. Основным недостатком этих подложек является относительно невысокая точность изготовления, на уровне $\lambda/30\text{--}\lambda/20$, где λ — рабочая длина волны интерферометра (чаще всего 632.8 nm). Причиной этого является использование при метрологии интерферометров с эталонными поверхностями [21], которые обеспечивают высокую относительную (по отношению к эталону) точность измерений, однако систематические ошибки эталонов не учитываются.

В настоящей работе подробно описывается методика получения высокоточных гладких сферических подложек с использованием механического притира и применяемая для этих целей метрология. Представлены экспериментальные результаты, полученные при доводке методом механического притира вогнутой сферической подложки из плавленного кварца (диаметр 100 mm , радиус кривизны $R_{\text{curv}} = 137.5 \text{ mm}$, числовая апертура $NA \approx 0.3$), изготовленной традиционным методом глубокой шлифовки полировки с точностью $\sim \lambda/20$, до уровня $\sim \lambda/200$. Описывается влияние среднего размера зерна используемой суспензии для полировки на шероховатость и форму подложки.



Рис. 1. Фото обрабатываемой подложки.

1. Методика эксперимента

1.1. Методика механического притира

Эксперимент проводился в специальной лаборатории, оснащенной кондиционированием воздуха, контролем температуры и влажности, что обеспечивало стабильность и воспроизводимость технологического процесса. Притир производился на доводочном станке Д-150. Шпиндель вращался от электромотора со средней скоростью „около“ 100 грп. Деталь обрабатывалась поступательными движениями с амплитудой, определяемой опытным путем, для обеспечения исправления aberrаций, ранее определенных посредством безэталонного интерферометра с дифракционной волной сравнения. Обработка поверхности велась смоляным полировальником (марка смолы СП5), поверхность которого в нагретом состоянии притиралась к обрабатываемой детали. В эксперименте использовались: водный раствор полирующего порошка широко используемой марки Opaline со средним размером зерна оксида церия $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$ и две суспензии на основе микропорошков оксида церия производства МФТИ, г. Долгопрудный, с размерами зерна $0.1\text{--}0.3$ и $0.03\text{--}0.1\ \mu\text{m}$.

Обрабатываемая подложка, фотография которой приведена на рис. 1, предназначена для разрабатываемого в настоящее время микроскопа с рабочей длиной волны $3.38\ \text{nm}$, лежащей в „окне прозрачности воды“ [22]. Особенностью подложки является наличие трех „ушей“ с отверстиями. После завершения притира в отверстия вклеиваются полированные шарики из карбида кремния для установки зеркала в объектив. Такая конструкция подложки в отличие от подложек с металлическими „ушами“ [23] обладает лучшей устойчивостью к нагреву, который неизменно возникает при последующих стадиях

ионно-пучковой обработки и напыления многослойного отражающего покрытия.

2. Методы измерений шероховатости и формы

Как отмечалось в ряде работ, например [23], в рентгеновском диапазоне на качество изображения и его освещенность оказывают влияние неровности (шероховатости) с латеральными размерами от диаметра зеркала до $1\ \text{nm}$ (диапазон пространственных частот $10^{-6}\text{--}10^3\ \mu\text{m}^{-1}$). Из-за столь широкого диапазона пространственных частот для полной характеристики поверхности его условно разделяют на три поддиапазона: низкочастотный (частоты $10^{-6}\text{--}10^{-3}\ \mu\text{m}^{-1}$), среднечастотный ($10^{-3}\text{--}10^0\ \mu\text{m}^{-1}$) и высокочастотный ($10^0\text{--}10^3\ \mu\text{m}^{-1}$). Низкочастотные шероховатости (распространенное их название — ошибки формы) измеряются с использованием интерферометрии [21,24]. Для измерения среднечастотных шероховатостей традиционно используют интерферометры белого света (ИБС) [25,26]. Плоские образцы могут измеряться с помощью диффузного рассеяния рентгеновского излучения (ДРРИ) [27,28], которое при определенных условиях [29] можно отнести к „первопринципному“ методу. Следует отметить еще один метод измерения среднечастотных шероховатостей, использующий интерферометрию с дифракционной волной сравнения, который так же можно отнести к „первопринципному“, но который пока не нашел широкого распространения [30]. Для измерения высокочастотных шероховатостей применяются атомно-силовые микроскопы (АСМ) [31].

Сравнение результатов измерений шероховатости подложек методами ИБС, АСМ и ДРРИ показало, что метод ИБС относительно неплохо работает только для подложек с эффективной шероховатостью больше $1\ \text{nm}$ [32,33]. Поэтому в своих исследованиях гладких поверхностей мы не используем этот метод.

Следует отметить, что АСМ также не относится к „первопринципному“ методу. На результаты измерений значительное влияние оказывают нелинейность пьезосканера, размер кончика и жесткость кантилевера. Поэтому периодически, а при использовании новой партии кантилеверов обязательно, производится калибровка чувствительности АСМ. Для этого для плоской гладкой подложки производится сравнение PSD (power spectral density — спектральная плотность мощности) функций шероховатости, измеренных методами АСМ и ДРРИ. Измерения признаются адекватными в том случае, если PSD-функции, измеренные обоими методами, совпадают в области пересечения их рабочих диапазонов. Измерения криволинейных поверхностей производятся на специальном стенде АСМ, позволяющем устанавливать локальную нормаль к поверхности исследуемой подложки в любой точке по оси зонда [34].

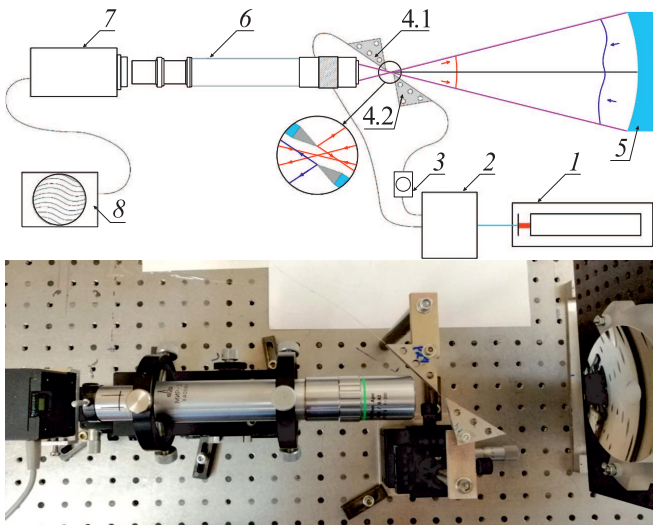


Рис. 2. Схема и фото интерферометра с дифракционной волной сравнения. 1 — He–Ne-лазер, 2 — устройство (на фотографии не показано), включающее оптоволоконные делитель пучка и контроллеры поляризации света в каналах, 3 — контроллер интенсивности света в канале эталонного фронта, 4.1 и 4.2 — ИЭСВ, 5 — исследуемая деталь, 6 — оптическая часть регистрирующей системы, 7 — цифровая видеокамера, 8 — компьютер.

Как отмечалось ранее, низкочастотные шероховатости (они же ошибки формы) определяются с помощью интерферометров. Основным недостатком классических интерферометров является наличие эталона, ограничивающего точность измерений десятками нанометров, что препятствует как достижению нанометровой точности, так и развитию метода получения высокоточных поверхностей. Для решения этой проблемы была использована безэталонная интерферометрия с дифракционной волной сравнения на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой, позволяющая измерять форму даже асферических поверхностей с субнанометровой точностью [35].

В настоящей работе для исключения необходимости наносить на исследуемую деталь отражающее покрытие, обеспечивающее выравнивание интенсивности отраженного от детали и эталонного фронтов, за основу была взята двухзондовая схема интерферометра, предложенная в [36]. Модифицированная схема и фотография интерферометра с исследуемой деталью приведены на рис. 2. Излучение стабилизированного по частоте и мощности He–Ne-лазера 1 заводится в одномодовое оптическое волокно. Далее с помощью оптоволоконного делителя пучков разделяется на два канала, в каждом из которых с помощью оптоволоконного контроллера устанавливается одинаковая поляризация на выходе каждого канала 2. В канале эталонной сферической волны установлено устройство, позволяющее контролировать интенсивность света на выходе 3, что позволяет выравнивать интенсивности рабочего и эталонного фрон-

тов при любом коэффициенте отражения исследуемой детали. К выходам обоих каналов подключаются когерентные между собой источники эталонной сферической волны (ИЭСВ, 4.1 и 4.2). Оба ИЭСВ устанавливаются в окрестности центра исследуемой сферической поверхности 5. Один из них направляется на исследуемую деталь, другой — на регистрирующую оптическую систему 6. Отраженный от исследуемой поверхности фронт, несущий информацию об ошибках формы, фокусируется в окрестности ИЭСВ и далее в виде расходящегося сферического фронта распространяется в направлении регистрирующей системы. В регистрирующей системе рабочий и эталонный фронты интерферируют и регистрируются с помощью цифровой видеокамеры 7. Далее информация поступает в компьютер 8.

Далее с помощью авторской программы по полученной серии из десяти интерферограмм восстанавливается карта отклонений формы поверхности от ближайшей сферы. Аппроксимация проводится с помощью полиномов Цернике [37]. Число членов в разложении определяется максимальной отображаемой пространственной частотой. При контроле обрабатываемой подложки в соответствии с [38] отображались неровности с латеральными размерами от 5 мкм и выше.

Суммарный вклад в ошибку измерений aberrаций ИЭСВ и оптической части регистрирующей системы оценивался по методике, описанной в [39], и составлял менее 1 нм.

3. Экспериментальные результаты

Экспериментально исследовалось влияние размера микропорошка полирующей суспензии и времени полировки на шероховатость и форму поверхности. На рис. 3, а приведены PSD-функции шероховатости исходной подложки, построенные по АСМ-кадрам 2×2 и $40 \times 40 \mu\text{m}$. Эффективная шероховатость поверхности определялась из соотношения

$$\sigma_{\text{eff}}^2 = \int_{\nu_{\text{min}}}^{\nu_{\text{max}}} \text{PSD}(\nu) d\nu,$$

где $\nu_{\text{min}} = 0.025 \mu\text{m}^{-1}$ — минимальная и $\nu_{\text{max}} = 65 \mu\text{m}^{-1}$ — максимальная пространственные частоты, и составила в среднем в 3-х точках $\sigma_{\text{eff}} = 1.1 \pm 0.1 \text{ nm}$.

Использование для притира водной суспензии Opalines размером зерна $0.5\text{--}1 \mu\text{m}$ в течение 2 h улучшило эффективную шероховатость до 0.66 nm, дальнейшая полировка не приводила к улучшению шероховатости (рис. 3, б).

После перехода на суспензию МФТИ с размером зерна $0.1\text{--}0.3 \mu\text{m}$ шероховатость после суммарного времени полировки 6–7 h упала до величины 0.36 nm. Дальнейшая полировка не приводила к улучшению шероховатости. PSD-функции шероховатости после полировки суспензией $0.1\text{--}0.3 \mu\text{m}$ приведены на рис. 3, с.

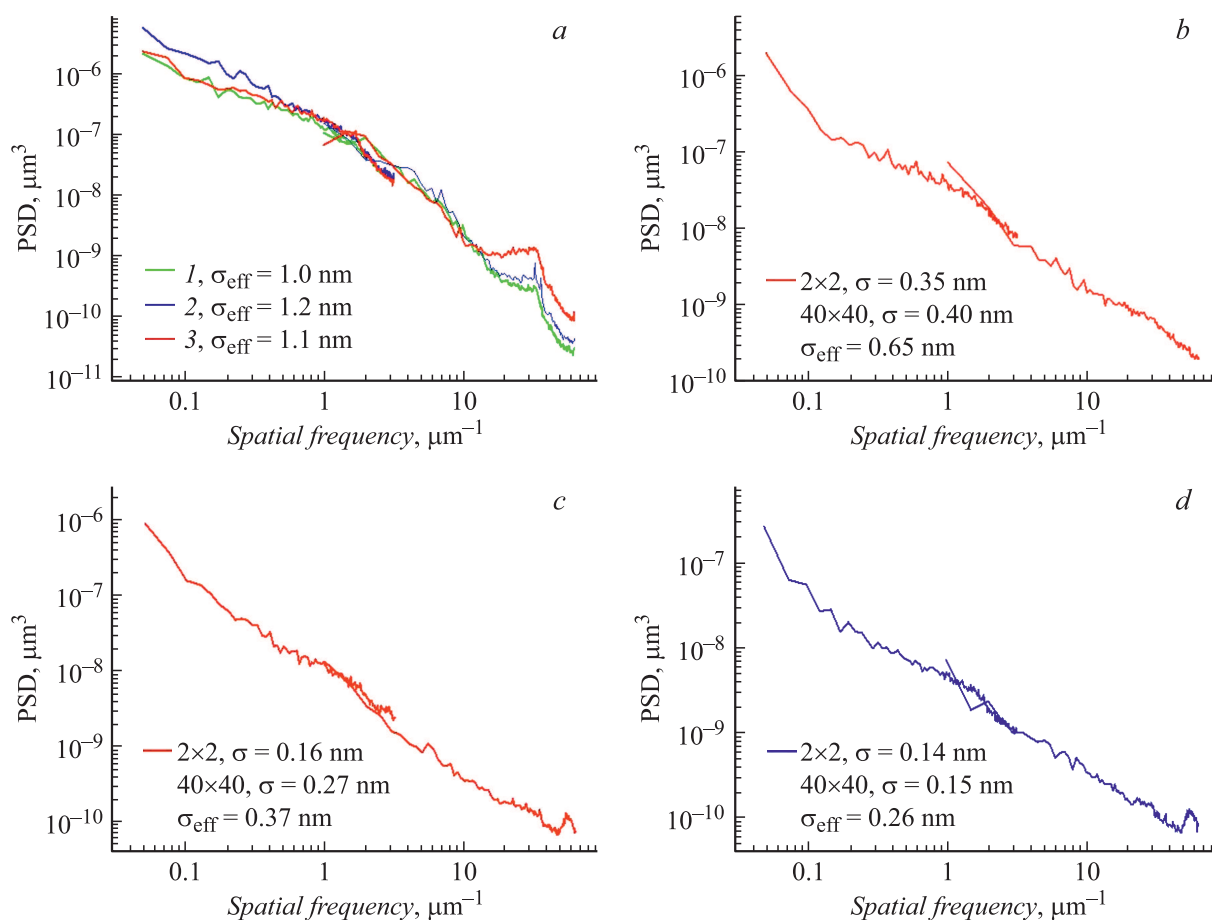


Рис. 3. PSD-функции шероховатости исходной подложки (a), после полировки Opaline (b), МФТИ 0.1–0.3 μm (c) и МФТИ 0.03–0.1 μm (d).

Переход на суспензию с размером зерна 0.03–0.1 μm в первые 4 h обработки не приводил к сглаживанию поверхности, а затем в течение последующих 3 h, она падала до величины 0.27 nm и стабилизировалась около этого значения (рис. 3, d).

Из приведенных данных следует, что уменьшение размера зерна полирующей суспензии приводит к сглаживанию поверхности. При этом оптимальное время полировки при переходе на более мелкую фракцию составляет 6–7 h. Дальнейшая полировка не приводит к улучшению шероховатости. В целом достигнутая при полировании суспензией МФТИ 0.03–0.1 μm эффективная шероховатость 0.26 nm соответствует мировому уровню [33].

Важным результатом является то, что средне- и высокочастотные шероховатости вносят примерно одинаковый вклад в эффективную шероховатость. Это позволяет ожидать, что эффективная шероховатость может быть уменьшена почти в два раза после ионной полировки, которая наиболее эффективно сглаживает высокочастотные шероховатости [33,40–42].

Исследование влияния размера зерна суспензии и времени обработки на форму поверхности показало более

сложный характер. В частности, оказалось, что ключевым звеном методики получения высокоточных поверхностей является время обработки. Эксперимент показал, что при подходе к точности формы на уровне 10 nm время обработки между последующими измерениями не должно превышать 20–30 min. При превышении времени обработки можно ожидать сильных скачков ошибок формы, на уровне 10 nm и больше.

Также при проведении интерферометрических измерений формы высокоточных поверхностей необходимо дать время на термостабилизацию подложки в интерферометре, которая может занять несколько часов, и следить за тем, чтобы исключить деформации поверхности при установке детали в интерферометр.

С учетом вышесказанного можно выделить определенные закономерности. Во-первых, размер зерна практически не влияет на точность формы, с той лишь оговоркой, что с увеличением размера зерна и в результате с увеличением скорости съема материала, необходимо сократить время обработки между измерениями. Во-вторых, время выхода на стационарный уровень ошибки формы поверхности хорошо совпадает со временем, когда шероховатость выходит на стационарное значение.

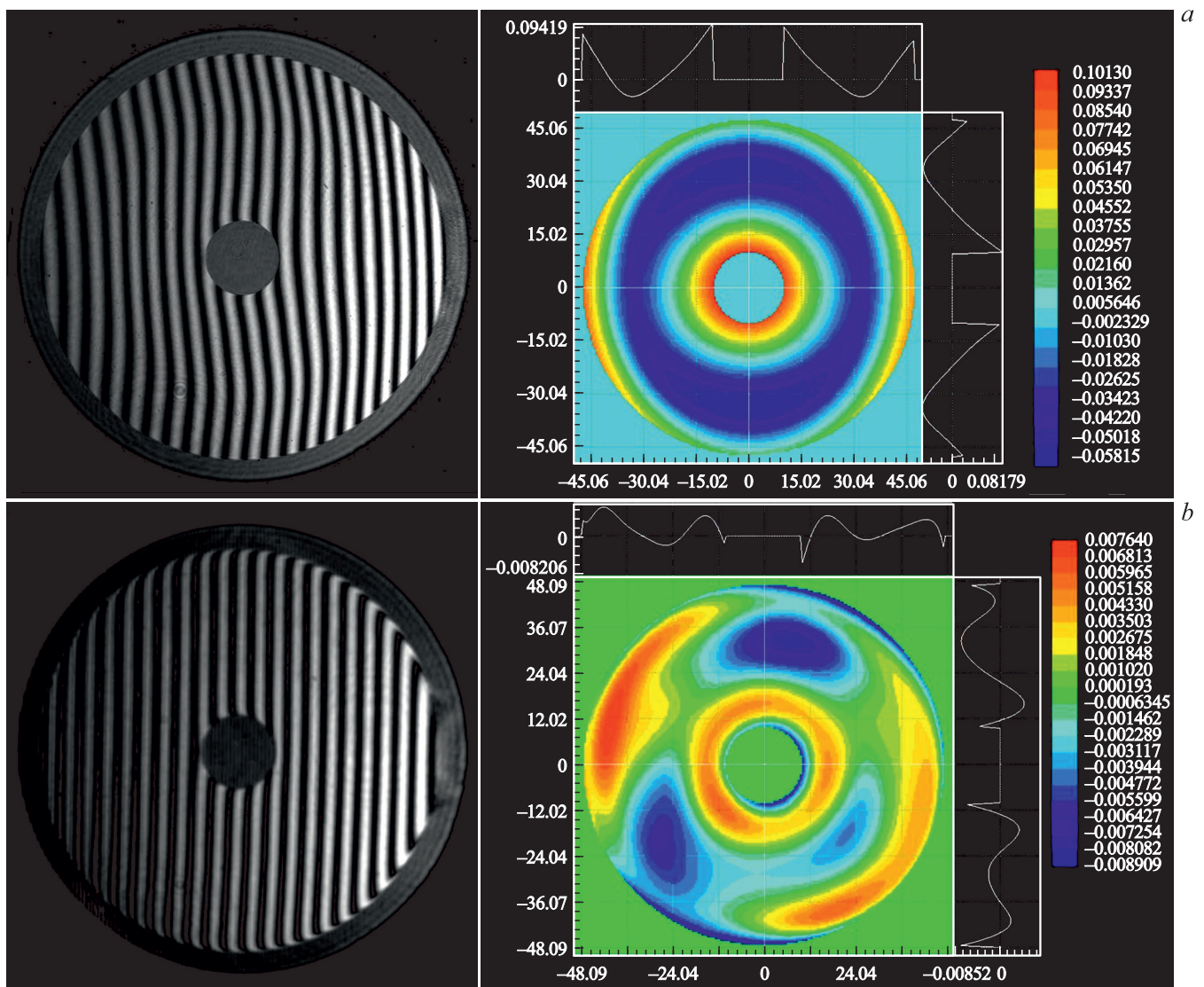


Рис. 4. Интерферограммы и карты формы поверхности подложки: исходная, максимальный размах $MP = 160$ nm, $SKO = 36$ nm (a); после процедуры притира, $MP = 16.6$ nm и $SKO = 3.3$ nm (b).

В-третьих, при переходе с одного размера зерна на другое можно ожидать скачка в ошибке формы, причем скачок сильнее при переходе с меньшего зерна на большее.

В описанном эксперименте минимальная ошибка формы $SKO = 3.3$ nm ($\sim \lambda/200$) была получена на суспензии $0.1-0.3$ nm. Однако и на суспензии $0.03-0.1$ nm уверенно получаются близкие значения. На рис. 4 приведены карты ошибок исходной поверхности с $SKO = 36$ nm ($\sim \lambda/20$) — a, и после доводки описанным методом $SKO = 3.3$ nm ($\sim \lambda/200$) — b. Как видно, точность формы была увеличена на порядок.

Заключение

Несмотря на то, что метод механического притира для изготовления высокоточных сферических и

плоских поверхностей используется уже несколько сотен лет тем не менее из-за ограниченных возможностей используемого в процессе производства и финальной аттестации изготовленной детали метрологического оборудования предельные возможности метода оставались не ясными. Применение интерферометрии с дифракционной волной сравнения, обеспечивающей достоверную точность измерений лучше $\lambda/1000$, позволило продвинуться в область больших точностей.

Основными результатами настоящего исследования стало следующее.

Первое: показано, что относительно „легко“ и „быстро“ методом механического притира можно изготавливать сферические подложки с точностью формы на уровне $\lambda/200$. Подробно описывается технологический процесс, позволяющий достичь этого результата.

Второе: показано, что ключевым фактором получения высокоточных поверхностей является наличие „беззатлонной“ интерферометрии. На основании ее данных было обнаружено, что длительность притира между измерениями должна быть минимальна и не превышать 20–30 min даже для самых мелкозернистых суспензий. Превышение этого времени может привести к большой (десятки нанометров) ошибке.

Третье: показано, что размер зерна слабо влияет на предельную точность изготавливаемых деталей.

Четвертое: прослежено влияние размера полирующего зерна суспензии на эффективную шероховатость поверхности. Наименьшая шероховатость (до 0.26 nm) была получена при использовании суспензии производства МФТИ, г. Долгопрудный, с размером зерна оксида церия в суспензии 0.03–0.1 μm . Исходя из прослеженной динамики, следует, что можно еще уменьшить шероховатость, если использовать суспензию с меньшим размером зерна. Этот результат важен еще и с той точки зрения, что он был получен без использования химико-механической полировки, которая негативно сказывается на точности формы поверхности.

Таким образом, описанный в работе метод позволяет относительно быстро получать подложки с нанометровой точностью формы поверхности и шероховатостью, соответствующей мировому уровню. Определены направления исследований для достижения ангстремной — субангстремной шероховатости, востребованной в ряде задач рентгеновской оптики.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН, при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения № 075-02-2018-182 (RFMEFI60418X0202).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Wood O., Arnold J., Brunner T. et al. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8322. 832203.
- [2] Mark N., Wurm S. // Adv. Opt. Technol. 2015. Vol. 4. N 4. P. 235–240. DOI: 10.1515/aot-2015-0036
- [3] Wu B., Kumar A. // Appl. Phys. Rev. 2014. Vol. 1. P. 011104.
- [4] Kim S.-S., Chalykh R., Kim H. et al. // Proc. SPIE. 2017. Vol. 10143. P. 1014306. DOI: 10.1117/12.2264043
- [5] Golub L., Nystrom G., Herant M., Kalata K., Lovas I. // Nature. 1990. Vol. 344. P. 842–844.
- [6] Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T. et al. // Sol. Phys. 2007. Vol. 243. N 1. P. 3–17.
- [7] Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. // Sol. Phys. 2012. Vol. 275. N 1–2. P. 3–15.
- [8] Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., Cyr O.C.St., Guhathakurta M., Christian E. // Space Sci. Rev. 2008. Vol. 13. N 1–4. P. 5–16.
- [9] Kobayashi K., Cirtain J., Winebarger A.R. et al. // Sol. Phys. 2014. Vol. 289. N 11. P. 4393–4412.
- [10] Kirz J., Jacobsen C., Howells M. // Rev. Biophys. 1995. Vol. 28. P. 130.
- [11] Takman P.A.C., Stollberg H., Johansson J.A. et al. // J. Microsc. 2007. Vol. 226. P. 175–181.
- [12] Bertilson M., von Hofsten O., Vogt U. et al. // Opt. Express. 2009. Vol. 17. P. 11057–11065.
- [13] Rehbein S., Heim S., Guttman P. et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 103. N 11. P. 110801.
- [14] Akhsakhalyan A.D., Kluev E.B., Lopatin A.Ya. // J. Surf. Invest.-X-Ray. 2017. Vol. 11. N 1. P. 1–19.
- [15] Admans G., Berkvens P., Kaprolat A., Revol J.-L. ESRF upgrade programme phase II (2015–2022). Technical design study. Imprimerie de Pont de Claix, 2014. 192 p. http://www.esrf.eu/Apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf
- [16] Thiess H., Lasser H., Siewert F. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2010. Vol. 616. P. 157–161.
- [17] Смирнов В.А. Обработка оптического стекла. 3-е изд. Л.: Машиностроение, 1980. 183 с.
- [18] Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V. et al. // Prec. Eng. 2017. Vol. 48. P. 338–346. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.004>
- [19] Brychikhin M.N., Chkhalo N.I., Eikhorn Ya.O. // Appl. Opt. 2016. Vol. 55. N 16. P. 4430–4435.
- [20] Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E. et al. // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2018. Vol. 4. N 1. P. 014003-1–014003-9.
- [21] Malacara D. Optical shop testing. 2nd ed. NY.: John Wiley&Sons, Inc., 1992. 792 p.
- [22] Malyshev I.V., Pestov A.E., Polkovnikov V.N. et al. // J. Surf. Invest.-X-Ray. 2018. Vol. 12. N 6. P. 1253–1263.
- [23] Dinger U., Eisert F., Lasser H. et al. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4146. P. 35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.406674>
- [24] Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
- [25] Blunt R. // Proc. of CEMANTECH Conf. Vancouver, Canada, 2006. P. 59–62.
- [26] Martinez-Galarce D., Soufli R., Windt D.L. et al. // Opt. Eng. 2013. Vol. 52. N 9. P. 095102-1-14.
- [27] Kozhevnikov I.V., Pyatakhin M.V. // J. X-Ray Sci. Technol. 2000. Vol. 8. P. 253–275.
- [28] Asadchikov V.E., Kozhevnikov I.V., Krivosov Yu.S. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2004. Vol. 530. P. 575–595.
- [29] Barysheva M.M., Chkhalo N.I., Drozdov M.N. et al. // J. X-Ray Sci. Technol. 2019. Vol. 27. N 5. P. 857–870. DOI: <http://dx.doi.org/10.3233/XST-190495>
- [30] Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N. et al. // Opt. Lett. 2015. Vol. 40. N 2. P. 159–162.
- [31] Griffith J.E., Grigg D.A. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. N 9. P. R83–R109.
- [32] Barysheva M.M., Vainer Yu.A., Gribkov B.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. Vol. 75. N 1. P. 67–72.
- [33] Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E. et al. // Opt. Express. 2014. Vol. 22. N 17. P. 20094–20106.
- [34] Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. Vol. 86. P. 016102.

- [35] *Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E.* et al. // *Appl. Opt.* 2016. Vol. 55. N 3. P. 619–625.
- [36] *Чхало Н.И., Малышев И.В., Пестов А.Е.* и др. // *УФН.* 2020. Т. 190. № 1. С. 74–91.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.05.038601>.
- [37] *Mahajan V.N., Dai G.M.* // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2007. Vol. 24. N 9. P. 2994–3016.
- [38] *Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Salashchenko N.N.* // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23. N 11. P. 14677–14694.
- [39] *Ахсахалян А.А., Гаврилин Д.А., Малышев И.В.* и др. // *ЖТФ.* 2019. Т. 89. Вып. 11. С. 1789–1794.
- [40] *Ziegler E., Peverini L., Vaxelaire N.* et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2010. Vol. 616. N 2–3. P. 188–192.
- [41] *Chen S., Li S., Peng X., Hu H., Tie G.* // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. N 6. P. 1478–1484.
- [42] *Chkhalo N.I., Churin S.A., Mikhaylenko M.S.* et al. // *Appl. Opt.* 2016. Vol. 55. N 6. P. 1249–1256.