15

Автоматизированная система для измерения формы поверхности крупногабаритных плоских и цилиндрических зеркал на интерферометре типа Физо

© Е.И. Глушков, И.В. Малышев, А.И. Николаев, Е.В. Петраков, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников

Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: eglushkov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 25 июня 2025 г.
В окончательной редакции 25 июня 2025 г.
Принято к публикации 25 июня 2025 г.

Описана автоматизированная система для измерения формы поверхностей зеркал с габаритами больше апертуры интерферометра Физо и цилиндрических зеркал на интерферометре Физо. Система построена на базе интерферометра Zygo Verifire с апертурой 100 mm. Образец установлен на моторизованную систему подвижек, осуществляющую линейное перемещение вдоль апертуры интерферометра и наклоны вокруг осей, перпендикулярных оптической оси интерферометра, и обеспечивающую перемещения, необходимые для проведения измерений методом сшивки субапертур. Сшивка осуществляется в конце измерений методом матрицы перекрытий. Система позволила определить систематическую ошибку измерений, в том числе ошибку эталона, методом одностороннего многократного сдвига и учитывать ее в измерениях, а также проводить измерения с повторяемостью на уровне 15 pm и точностью на субнанометровом уровне.

Ключевые слова: интерферометр Физо, высококогерентная интерферометрия, субапертуры, автоматизированная 3*D*-система, система нанофокусировки Киркпатрика–Баеза.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61352.170-25

Введение

Высокоточная метрология формы подложек и готовых зеркал обычно осуществляется с помощью методов высококогерентной (лазерной) интерферометрии. В частности, наиболее распространенной системой являются интерферометры Физо [1–3]. Интерферометры измеряют разницу волновых фронтов, отраженных от исследуемой поверхности (рабочий фронт) и от эталонной поверхности (опорный фронт). Соответственно любые ошибки эталонной поверхности вносят вклад в систематическую ошибку измерений. Достижимая точность эталонов традиционно ограничивала использование интерферометров Физо для характеризации рентгеновской оптики, которая требует высокой точности на больших апертурах. По этой причине метрология рентгеновской оптики осуществлялась с использованием инструментов для измерения углов, таких как профилометры LTP (Long Trace Profiler) [4] и NOM (Nanometer Optical measuring Machine) [5]. Развитие измерений методом сшивки субапертур позволило проводить измерения длинных плоских и цилиндрических зеркал с использованием интерферометра Физо с субнанометровой точностью [6–8]. Методы сшивки используют избыточность данных, содержащихся в перекрывающихся областях между соседними измерениями, чтобы объединить измеренные субапертуры [9]. Преимущество использования интерферометра Физо заключается в том, что он позволяет измерять одномоментно бóльшую, по сравнению с профилометрами, площадь поверхности.

Учет систематической ошибки измерений с использованием интерферометра Физо (абсолютное измерение), в частности, ошибки эталона, необходим для измерения оптических поверхностей с точностью на уровне единиц нанометров и менее. Высокоточные эталонные зеркала для интерферометра Физо очень дороги, и их форма обычно имеет меньшую точность ($\lambda/20$, $\lambda/50$ по размаху высот профиля PV (peak-to-valley) — 30–10 nm), чем у высокоточных измеряемых плоскостей (единицы nm по параметру PV).

Методы абсолютного измерения включают метод жидкой плоскости [10], метод псевдосдвига [11], метод трех плоскостей и его варианты [12]. Измерение плоскости дифракционной решетки также позволяет откалибровать тракт интерферометра и определить систематическую ошибку измерений [13]. Традиционный метод трех плоскостей основан на взаимных измерениях трех плоскостей с использованием определенных приближений и аппроксимаций полиномами с заранее определенной максимальной степенью для получения абсолютной формы измеряемой поверхности. Недостатком такого подхода является невозможность учета ошибок формы с пространственной частотой выше выбранной и сингулярных ошибок формы. Существенным недостатком метода трех плоскостей является необходимость использования трех дорогостоящих эталонных плоскостей. Современные методы проведения абсолютных измерений основаны на

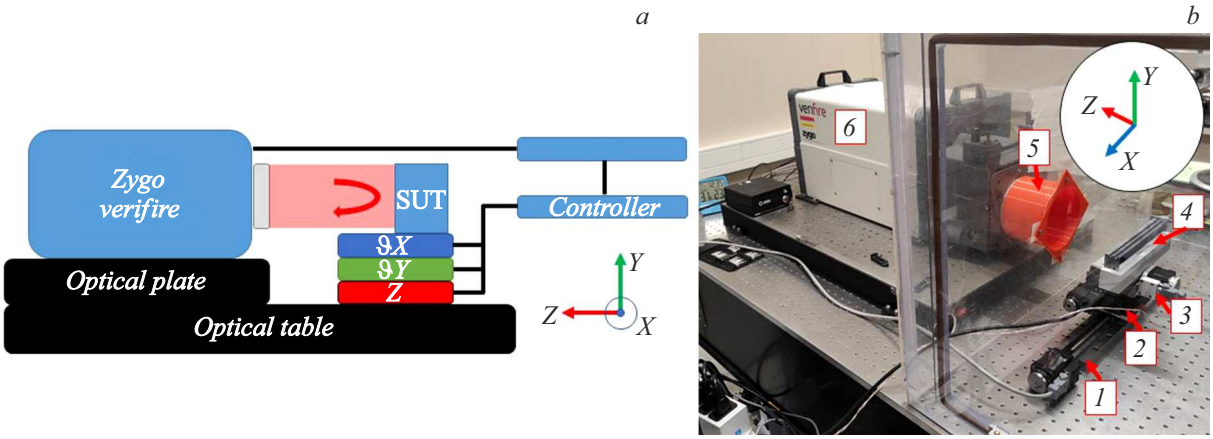

Рис. 1. Метрологическая система для измерения зеркал: *1* — линейная Z-подвижка; *2* — наклонная ϑY-подвижка; *3* — наклонная ϑX-подвижка; *4* — исследуемая поверхность; *5* — защитный экран для изоляции от внешних потоков воздуха, соединяющий короб и эталон интерферометра; *6* — интерферометр Физо.

анализе информации, содержащейся в каждом пикселе, и не используют аппроксимацию поверхности полиномами, что обеспечивает высокое пространственное разрешение измерений.

Метод одностороннего многократного сдвига (Unidirectional Multi-Shifted Method) [14,15] позволяет определить систематическую ошибку измерений на интерферометре Физо с использованием лишь двух плоских отражающих поверхностей (эталонной и исследуемой). В результате одностороннего многократного сдвига получается избыточный набор данных об измеряемой поверхности, позволяющий составить переопределенную систему линейных уравнений, решение которой дает информацию о систематической ошибке измерений. Кроме того, такой подход позволяет исключить влияние высокочастотных артефактов, например, интерференционных колец, возникающих из-за дифракции рабочего и эталонного фронтов на дефектах (пылинках) эталона, на результаты измерений [16].

Мотивацией к развитию нашей измерительной системы послужило создание в России ЦКП „СКИФ“ [17], для которого для станции 1-1 „Микрофокус“ [18–20] в ИФМ РАН были созданы двухзеркальный многослойный монохроматор (ДЗМ) [21,22] и система нанофокусировки Киркпатрика-Баеза (КБ) [18]. Для ДЗМ требовалось создать два плоских зеркала длиной 200 mm. Для КБ системы — два зеркала с формой эллиптического цилиндра (цилиндр с направляющей в форме эллипса) длиной 200 mm.

В настоящей работе описана измерительная система, созданная в ИФМ РАН для метрологии крупногабаритных (под крупногабаритными в настоящей работе имеются ввиду поверхности с габаритным размером больше апертуры интерферометра) плоских и цилиндрических зеркал (далее в работе под зеркалами или исследуемыми поверхностями будут пониматься эти два типа зеркал, если не оговорено иное) в автоматическом режиме. Несмотря на то что в работе акцент делается на вышеуказанные типы зеркал, данная система позволяет измерять существенно больше типов деталей.

1. Схема измерительной системы

На рис. 1 представлена измерительная система, созданная в ИФМ РАН для проведения высокоточных измерений формы поверхности зеркал. В качестве интерферометра Физо используется интерферометр Zygo Verifire ($\lambda = 632.8$ nm) с плоской эталонной поверхностью ($4''$, PV $< \lambda/20$). Волновой фронт, отраженный от эталонной поверхности, является опорным.

Исследуемая поверхность (ИП) располагается на системе подвижек (компания Standa, Литва): линейная (8MT160-300) Z-подвижка, наклонная (8MR151) ϑY-подвижка и наклонная (8MG00V-80) ϑX-подвижка. Их основные технические характеристики можно найти на сайте производителя [23]. ИП с системой подвижек расположены в коробе, изолирующем систему от внешних воздушных потоков и пыли. Дополнительно короб соединен с интерферометром защитным экраном (рис. 1, *5*). Измерительная система расположена на оптическом столе, стоящем на бетонных плитах здания. Измерения полностью автоматизированы.

Управление осуществляется микроконтроллером ATMega2560, используются драйверы на базе микросхемы TB6600.

2. Анализ источников ошибок измерений

На точность измерений формы поверхности влияют систематические (обсуждаются в конце настоящей работы) и случайные ошибки. Случайные ошибки приводят к снижению повторяемости измерений. Для измерений с

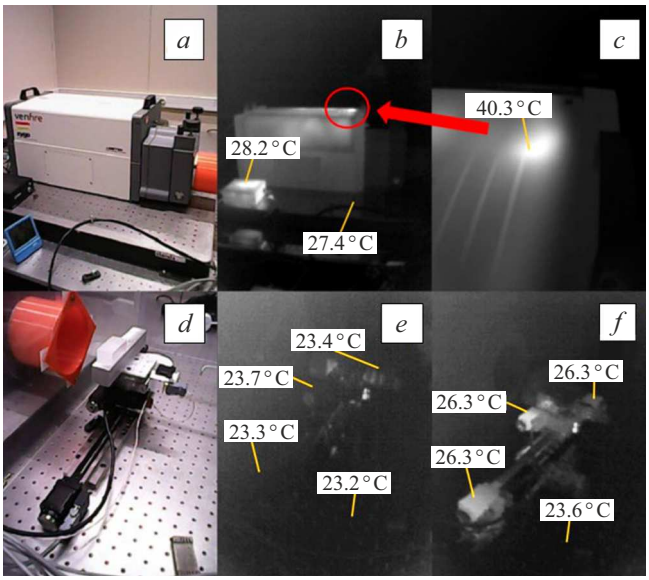

Рис. 2. Основные источники тепла в измерительной системе: *a* — снимок интерферометра в видимом диапазоне; *b* — снимок интерферометра, достигшего рабочей температуры, в ИК-диапазоне; *c* — увеличенный снимок самой горячей точки интерферометра, обведенной на *b* красным; *d* — снимок подвижек в видимом диапазоне; *e* — снимок подвижек в ИК диапазоне при проведении измерений без использования режима удержания моторов; *f* — снимок подвижек при установке моторов в режим удержания.

субнанометровой точностью необходимо, чтобы повторяемость измерений была лучше нанометра. Основными факторами, негативно влияющими на повторяемость измерений, являются потоки воздуха в области между эталонной и исследуемой поверхностями и вибрации в измерительной системе. Ниже будут описаны предпринятые меры для минимизации влияния этих факторов.

Основными причинами возникновения воздушных потоков в нашей измерительной комнате являются различные тела с температурой, значительно отличающейся от комнатной. К таким телам можно отнести оператора измерительной системы, лазер интерферометра, моторы шаговых двигателей, работающие электроприборы (компьютер, контроллеры, блоки питания). На рис. 2 приведены некоторые локальные значения температур в измерительной системе. Температурные измерения проведены с использованием тепловизора A-BF RX-500 (разрешение 256 × 192 пикселей, Китай).

Для изоляции области между эталонной и исследуемой поверхностями от внешних потоков воздуха были приняты следующие меры. Во-первых, ИП на системе подвижек помещена в короб. Из-за того, что интерферометр греется во время работы до температуры $\sim 40\,^{\circ}$C, он вынесен из короба. Во-вторых, был изготовлен защитный экран, соединяющий короб и эталон интерферометра. Зазор между защитным экраном и эталоном составляет 1 mm, что, как показала практика, исключает его влияние на форму эталона.

Внутри короба в качестве основного источника тепла выступают моторы (шаговые двигатели, ШД). Для того чтобы минимизировать влияние (рис. 3) нагрева моторов на результаты измерений, по возможности подвижки следует располагать так, чтобы моторы оказались вне области между эталоном и исследуемой поверхностью. Из рисунка видно, что измерение при включенных моторах приводит к существенным искажениям формы поверхности, СКО (RMS, среднеквадратичное отклонение) формы поверхности увеличилось с 1.4 до 2.3 nm.

ШД греются в двух случаях. Во-первых, при подаче синхроимпульсов для вращения мотора. Во-вторых, при подаче тока удержания. Заранее отметим типичные режимы работы подвижек в системе. Линейная Z-подвижка перемещается на конечные расстояния, в которых происходит измерение ИП. ϑY- и ϑX-подвижки работают в одношаговом режиме с паузой не менее 1 s между шагами. Для минимизации нагрева моторов в первом случае следует выбирать рабочий ток драйвера минимальным, при котором возможно перемещения без пропуска шагов. Во втором случае нами было принято решение работать в режиме без токов удержания. Работа осуществляется со следующими настройками рабочих токов: ϑX-подвижка — 0.3 A, ϑY-подвижка — 0.5 A, X-подвижка — 0.8 A.

Измерения температуры моторов ϑZ- и ϑX-подвижек в течение одношаговых перемещений с интервалом 1 s показали, что моторы не греются. Перемещения линейной подвижки в процессе сканирования осуществляются в непрерывном режиме, что приводит к нагреву на температуру, величина которой зависит от силы тока в обмотках ШД, сопротивления обмоток ШД и длительности перемещения. В нашей системе мотор линейной подвижки находится на значительном расстоянии от области между эталоном и исследуемой поверхностью (рис. 1 и 2), и не влияет на повторяемость измерений.

Для минимизации влияния воздушных потоков, и градиента температур в области между эталоном и исследуемой поверхностью расстояние между ними должно быть, как можно меньше. В работе [24] показано, что оптимальная длина области между эталоном и ИП должна составлять единицы сантиметров для достижения субнанометровой точности измерений.

На рис. 4 приведены результаты исследования повторяемости измерений в нашей системе. Для наглядности влияния защитного экрана на повторяемость приведены результаты измерений с ним и без него. Видно, что экран позволяет достичь повторяемости измерений на уровне 15 pm по СКО. Такой подход к изоляции от внешних воздушных потоков позволяет добиться высокой повторяемости измерений при малом числе усреднений. Его недостатком является то, что в системе остаются медленные тепловые потоки, влияние которых не удастся эффективно минимизировать усреднением. В работе [25] авторы продемонстрировали, что добавление случайных

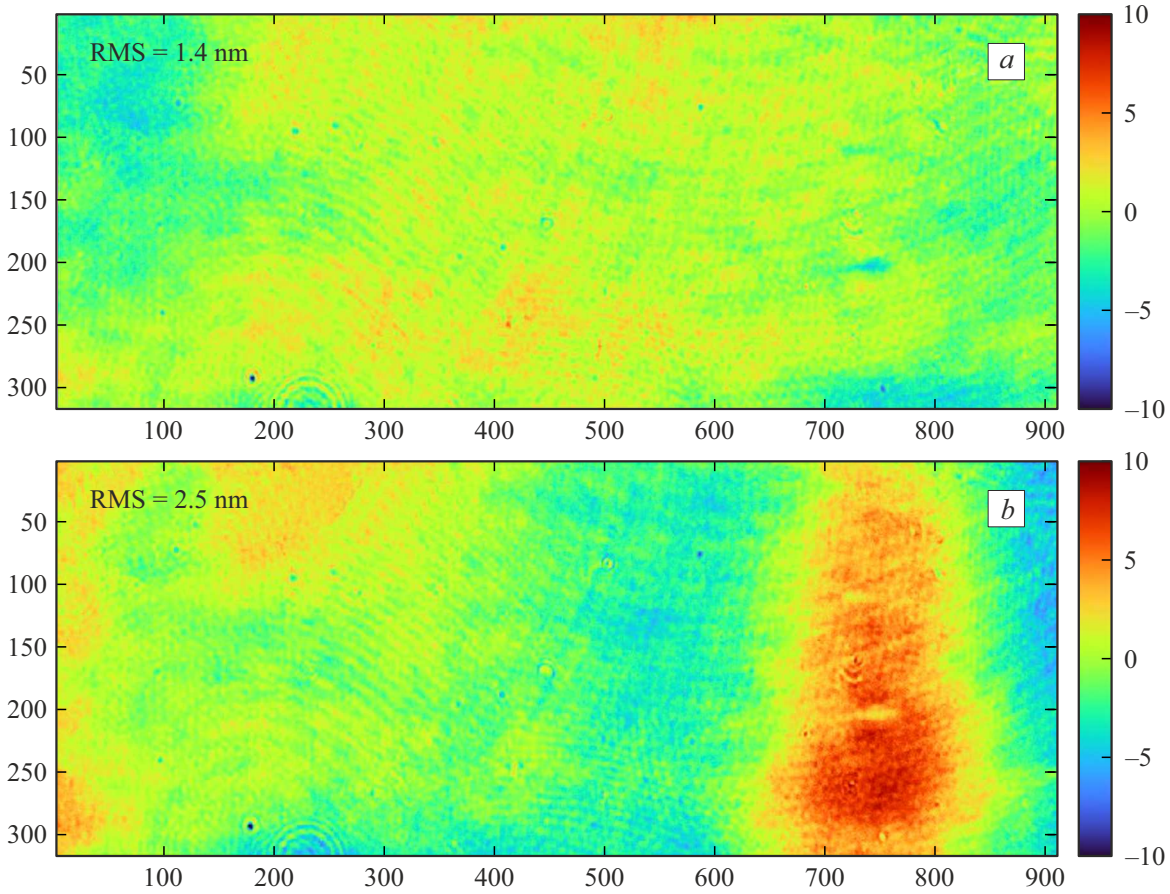

Рис. 3. Измерение одной и той же области ИП при: *a* — отсутствии тока в обмотках ШД; *b* — наличии тока.

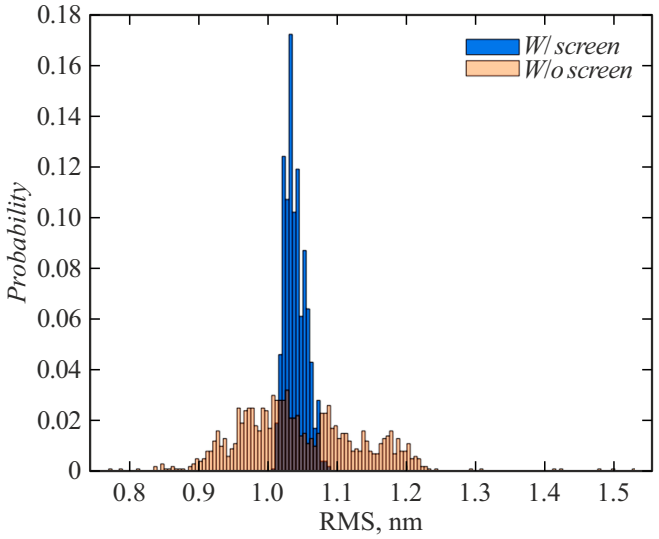

Рис. 4. Влияние защитного экрана на повторяемость измерений: $\sigma_{with\ screen} = 15$ pm, $\sigma_{without\ screen} = 90$ pm.

потоков воздуха в измерительную систему с помощью вентиляторов с использованием оптимального числа усреднений позволяет уменьшить влияние медленных остаточных потоков и достичь повторяемости 1 pm по СКО.

Вибрации оказывают существенное влияние на результаты измерений. Во-первых, они понижают повторяемость измерений. Во-вторых, они приводят к возникновению эффекта впечатывания интерференционных полос при определении формы поверхности методом фазового сдвига [26]. Источниками вибраций в измерительной комнате являются колебания здания и моторы подвижек.

Для минимизации влияния колебания здания, в котором проводятся измерения, измерительная система собрана на виброизолированном оптическом столе, установленном на фундамент задания.

Базовое разрешение (минимальный шаг) ϑY- и ϑX-подвижек не позволяет эффективно минимизировать ошибку трассировки (подробно о трассировке будет сказано ниже). Поэтому управление подвижками осуществляется в микрошаговом режиме с делением 1:16. Такой режим работы негативно сказывается на устойчивости выставленного положения ротора, что в некоторых положениях приводит к значительным вибрациям мотора. Для исключения влияния таких вибраций ток удержания моторов снимается после окончания перемещения. Отметим, что снятие тока удержания после перемещения

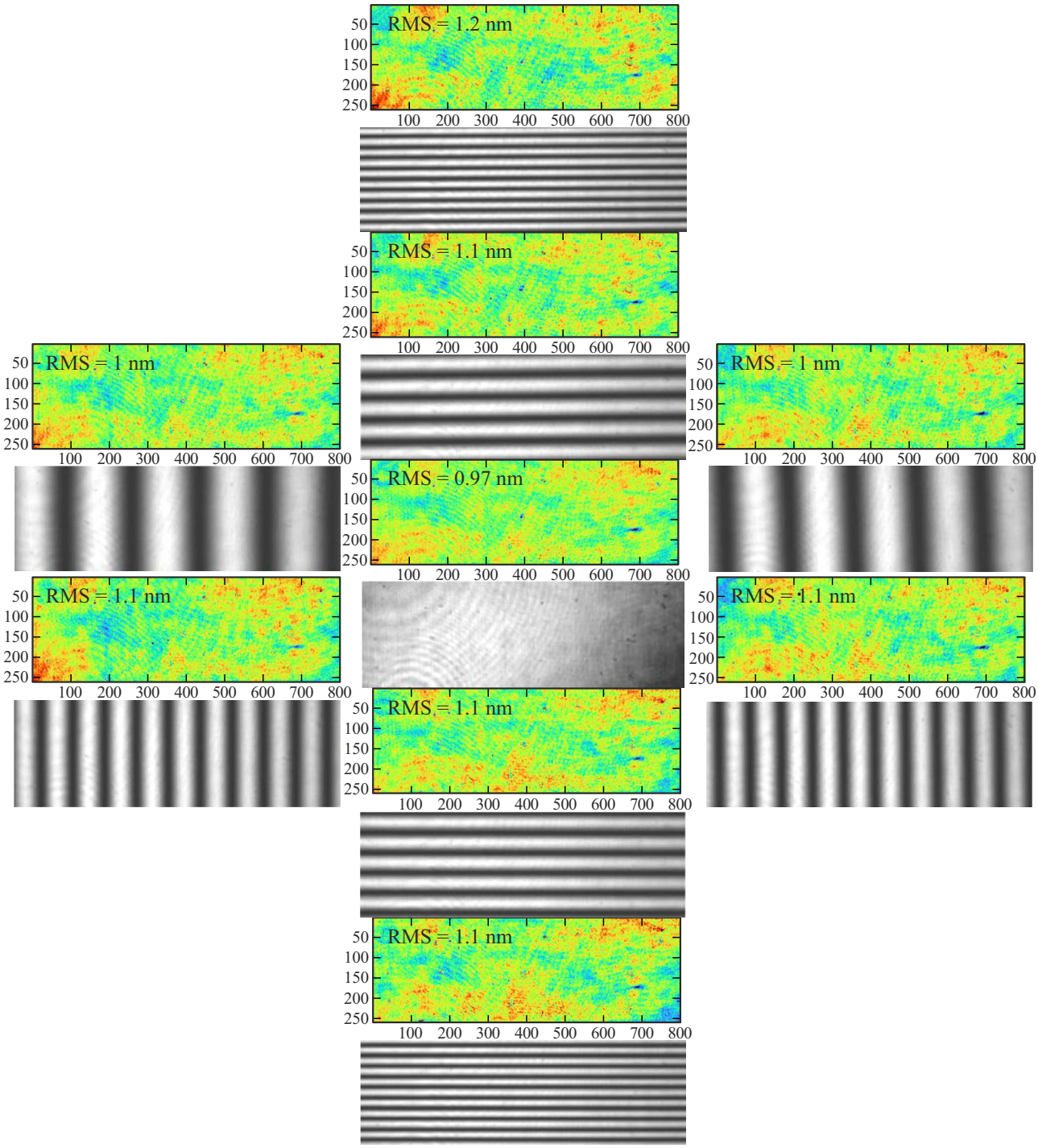

Рис. 5. Демонстрация влияния числа полос на результат измерения.

не приводит к неконтролируемому изменению положения ротора мотора при движении в одном направлении.

3. Методика выставления нуля полос для плоских зеркал

Следующим важным фактором, необходимым для учета с целью увеличения точности измерений, является ошибка трассировки лучей [27]. Ошибка трассировки в случае плоских зеркал заключается в том, что при непараллельности зеркала и эталона лучи, отраженные от поверхности образца, проходят в оптической схеме интерферометра путь, отличный от пути, пройденного опорной волной. На рис. 5 представлено влияние ошибки трассировки на результаты измерений. Наклон зеркала относительно эталонной поверхности приводит к значительному изменению интенсивности на отдельных

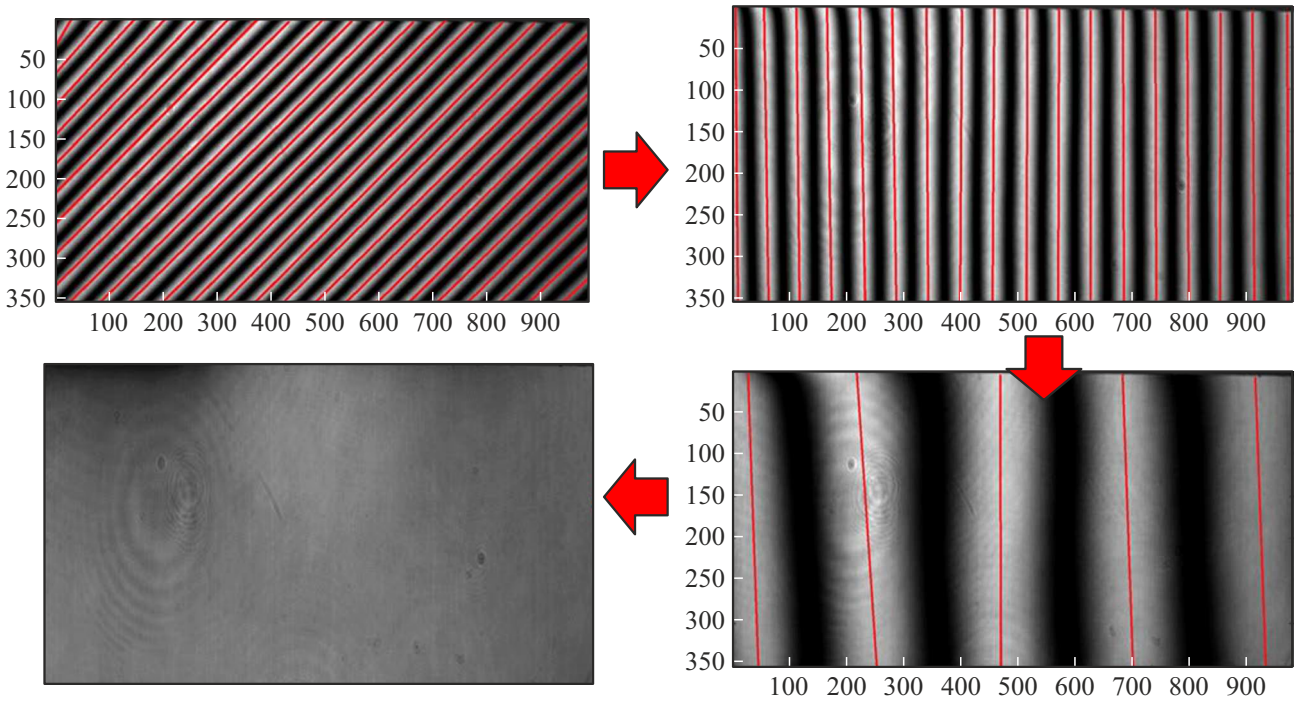

Рис. 6. Принципиальная схема выставления нуля полос для плоских зеркал. Наклонной подвижкой средний угол наклона аппроксимирующих прямых приравнивается 90°. Затем ϑY-подвижкой число полос уменьшается до одной, и за счет алгоритма выставления нуля полос на люфтах достигается интерферограмма с пороговой интенсивностью.

участках карты поверхности, а СКО может меняться от 0.97 до 1.2 nm.

Для минимизации влияния ошибки трассировки нами была разработана методика перемещения образца, позволяющая достигнуть состояния с нулем интерференционных полос. Методика заключается в следующем:

1. Бинаризованное изображение интерферограммы разделяет ее на области единиц и нулей. Единицы соответствуют светлым полосам, а нули — темным. Примем для дальнейших рассуждений, что светлых полос получилось N;

2. Светлые полосы аппроксимируются прямыми $y = k_i x + b_i$, $i = 1 \ldots N$ методом наименьших квадратов, откуда получаем средний угол наклона полос $\alpha = \Sigma \mathrm{atg}(k_i)/N$;

3. ϑX-подвижкой достигаем состояния, когда $\alpha = 90°$;

4. ϑY-подвижкой достигаем состояния $N = 1$;

5. Далее вращением в положительном и отрицательном направлениях вблизи состояния $N = 1$, находим положение, при котором средняя нормированная интенсивность интерферограммы близка нулю или единице по определенному порогу, что соответствует состоянию с нулем интерференционных полос;

6. Ждем 10 s (программное обеспечение интерферометра Zygo Verifire позволяет по интерферограмме определить относительные колебания опорного и отраженного от исследуемой поверхности фронтов с помощью функции Environment Test. С помощью данной функции мы видим, что после линейного перемещения возникает интенсивное колебание на частотах вблизи 0.15 Hz. При этом СКО колебаний превышает 1 nm. Из предположения, что для затухания самого интенсивного колебания на самой низкой частоте оно должно совершить не менее 1 периода, время ожидания было выбрано 10 s. Наблюдения показывают, что данный подход позволяет проводить измерения при СКО колебаний меньше 1 nm);

7. Делаем измерение.

Рис. 6 иллюстрирует процедуру выставления нуля полос для плоских зеркал.

4. Методика выставления нуля полос для цилиндрических зеркал

В отличие от плоских зеркал, асферические (вообще говоря, любые не плоские) зеркала всегда подвержены влиянию ошибки трассировки при измерении относительно всей поверхности эталона, и достичь состояния с нулем полос на всей поверхности зеркала невозможно. Поэтому при измерении асферических зеркал нужно выделять область интерферограммы с минимальным количеством полос и проводить измерения на ней.

Для минимизации ошибки трассировки для асферических зеркал разработан следующий алгоритм перемещений.

1. Выделяем на интерферограмме область с наименьшей плотностью интерференционных полос (рис. 7), интерферограмма цилиндра.

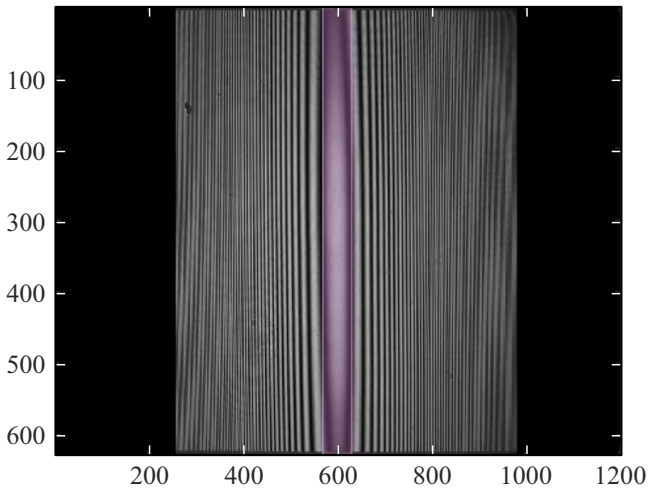

Рис. 7. Интерферограмма цилиндра с наложенной маской. Маской выделена область с „нулем полос“, в которой измерения минимально подвержены ошибке трассировки.

2. Бинаризованное изображение интерферограммы разделяет ее на области единиц и нулей. Единицы соответствуют светлым полосам, а нули — темным. Примем для дальнейших рассуждений, что светлых полос получилось N.

3. Для выбора белых полос с целью дальнейшей обработки проведем их разделение на группы. Каждая белая полоса проверяется на параболичность формы и отсутствие разрывов в анализируемой области.

4. Аппроксимируем отобранные кривые параболической функцией $y = ax^2 + bx + c$ методом наименьших квадратов.

5. У полученных кривых найдем координату минимума $x = -\frac{b}{2a}$. Далее находим среднюю минимальную координату и следим за ней.

6. ϑY-подвижкой перемещаем координату минимума к середине измеряемой области.

7. ϑX-подвижкой доводим число парабол до единицы.

8. ϑX-подвижкой на люфтах достигаем состояния с пороговым значением средней интенсивности интерферограммы.

9. Ждем 10 s.

10. Делаем измерение.

Рис. 8 иллюстрирует процедуру выставления нуля полос для цилиндрических зеркал.

5. Улучшение контраста на кремнии

Для синхротронов последнего поколения зеркала изготавливаются в основном из монокристаллического кремния [28]. В нашем интерферометре используется эталон из плавленого кварца, который позволяет получать интерферограммы от кварцевых подложек с высоким контрастом. Порог бинаризации в алгоритмах выставления нуля полос определяется методом Оцу [29], который дает хорошие результаты при бинаризации интерферограммы, полученной на кварце. Интерферограммы, получаемые от кремниевых подложек, обладают более низким контрастом из-за разницы коэффициентов отражения лазерного излучения от плавленого кварца (материал эталона) и кремния, что, в совокупности с неоднородностью распределения интенсивности опорного волнового фронта из-за повреждения покрытия эталона на матрице CMOS детектора интерферометра, становится причиной, по которой светлые интерференционные полосы при бинаризации оказываются темными.

Для обработки интерферограмм, полученных на кремнии, экспериментально был подобран метод адаптивного выравнивания гистограмм с ограничением контраста [30]. На рис. 9 показано, что данный метод позволяет разрешить все интерференционные полосы.

6. Основные методики измерений с использованием созданной системы

Созданная система позволяет эффективно проводить измерения по методикам сшивки плоских и цилиндрических зеркал, а также определять систематическую ошибку измерений сдвигом.

Для измерений плоских зеркал методом сшивки на апертуре интерферометра задается прямоугольная цифровая маска, в которой будут проводиться измерения субапертур. Размер маски выбирается максимально возможным, при этом она не должна включать края эталона, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Далее в программе задаются длина зеркала и шаг сшивки, который выбирается таким, чтобы площадь области перекрытия двух последовательных субапертур составляла не менее 90% (величина взята из мировой практики) от размера маски [31]. Затем для плоских зеркал с помощью ϑX- и ϑZ-подвижек выставлятся ноль полос. После этого ждем 10 s, считая, что за это время зеркало придет в механически равновесное состояние. Для уменьшения влияния случайных ошибок измерение проводится с усреднением по 20 кадрам. После измерения с помощью Z-подвижки осуществляется перемещение зеркала на шаг сшивки с выставлением ϑY-подвижкой большого числа полос, что позволяет отслеживать изменение угла наклона полос с лучшим разрешением в режиме одношагового сканирования. В конце измерений снимки субапертур сшиваются методом матрицы перекрытий [9].

При измерении цилиндрических зеркал, вообще говоря, не удается избежать ошибки трассировки на всей видимой апертуре интерферометра. Поэтому размер маски выбирается таким, чтобы в нем было минимальное число интерференционных полос (рис. 7). Последующие действия аналогичны методике сшивки плоских зеркал.

Эффективным методом определения систематической ошибки измерений является метод сдвига [14,15]. Алго-

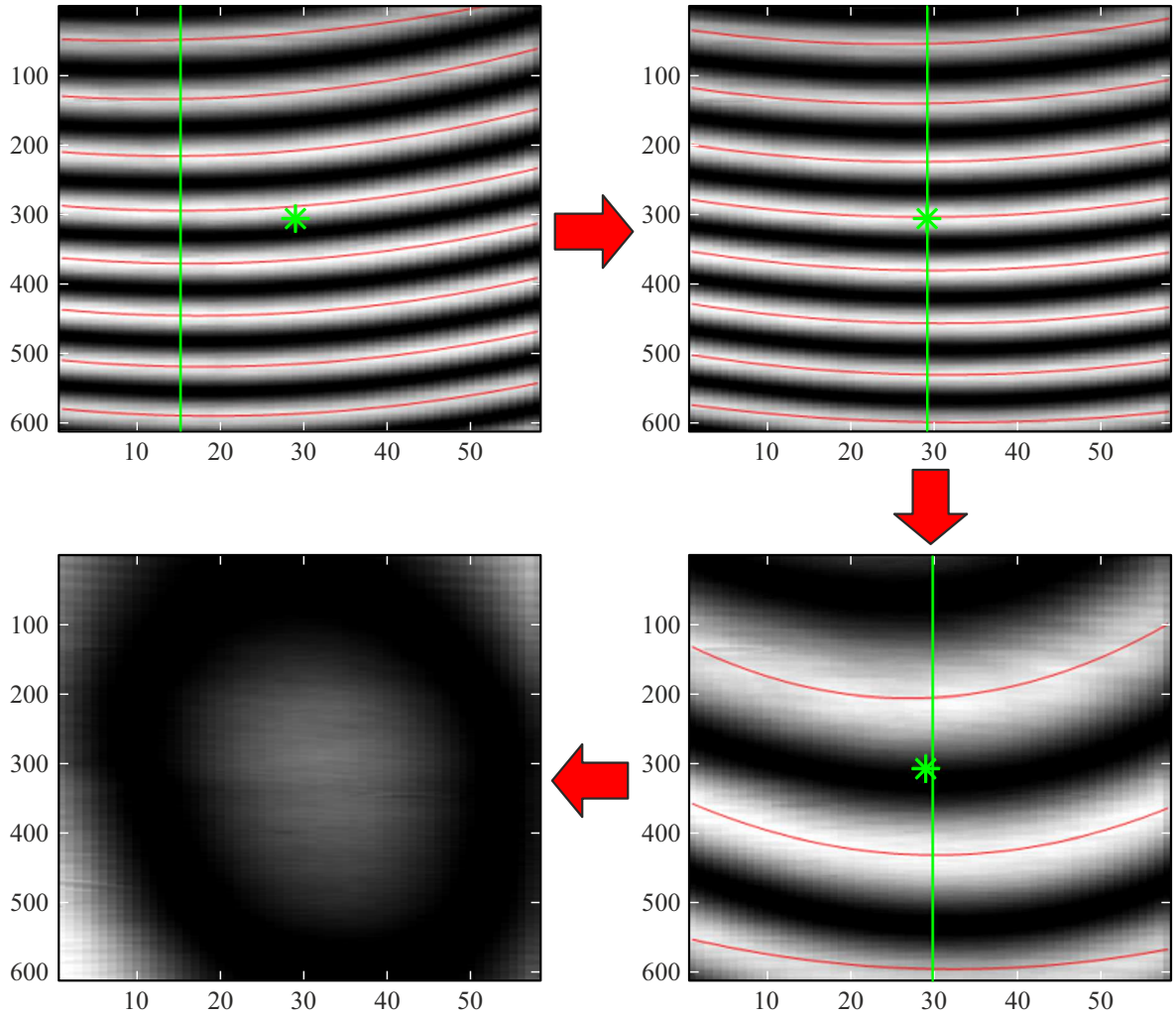

Рис. 8. Принципиальная схема выставления нуля полос для цилиндрических зеркал. Стрелками указан путь от начальной интерферограммы до конечной. Красными кривыми показаны параболы, аппроксимирующие белые интерференционные полосы, использующиеся для обратной связи. Зеленая вертикальная прямая соответствует средней абсциссе вершин парабол. Зеленой звездочкой обозначен центр изображения, к которому стремится вертикальная линия. После совмещения линии с центром минимизируется число парабол, и на люфтах достигается пороговое значение средней интенсивности интерферограммы.

ритм перемещений для данного метода аналогичен алгоритму для метода сшивки субапертур плоских зеркал. По сравнению с методом трех плоскостей, он позволяет оперативно учитывать систематическую ошибку в процессе измерения зеркал методом сшивки. Это особенно важно для измерительных систем, которые находятся в переменных климатических условиях, в связи с зависимостью показателя преломления среды, формы эталонной и исследуемой поверхностей от температуры [24] и формы эталонной поверхности от влажности [32].

На рис. 10 приведены результаты измерений цилиндрического эллипса и плоскости длиной 200 mm методом сшивки субапертур. Как видно из рис. 10 разработанные методики позволяют измерять на интерферометре с плоским эталонным фронтом цилиндрические поверхности с максимальным отклонением от плоскости в десятки μm. На рис. 11 приведен результат учета систематической ошибки измерений на участке эталона 20×40 mm с помощью плоского зеркала. Измеренное СКО фрагмента эталона составило около 1.09 nm, а СКО фрагмента зеркала — 0.62 nm, что указывает на возможность на созданной измерительной системе проведения измерений с субнанометровой точностью.

Заключение

Основными результатами работы стало следующее.

1. В ИФМ РАН на базе интерферометра Физо Zygo Verifire с плоским эталоном создана автоматизированная 3D-система для измерения крупногабаритных плоских и цилиндрических зеркал, в том числе с формой параболического и эллиптического цилиндров.

2. Для системы был разработан алгоритм автоматической ориентации образца параллельно эталону интер-

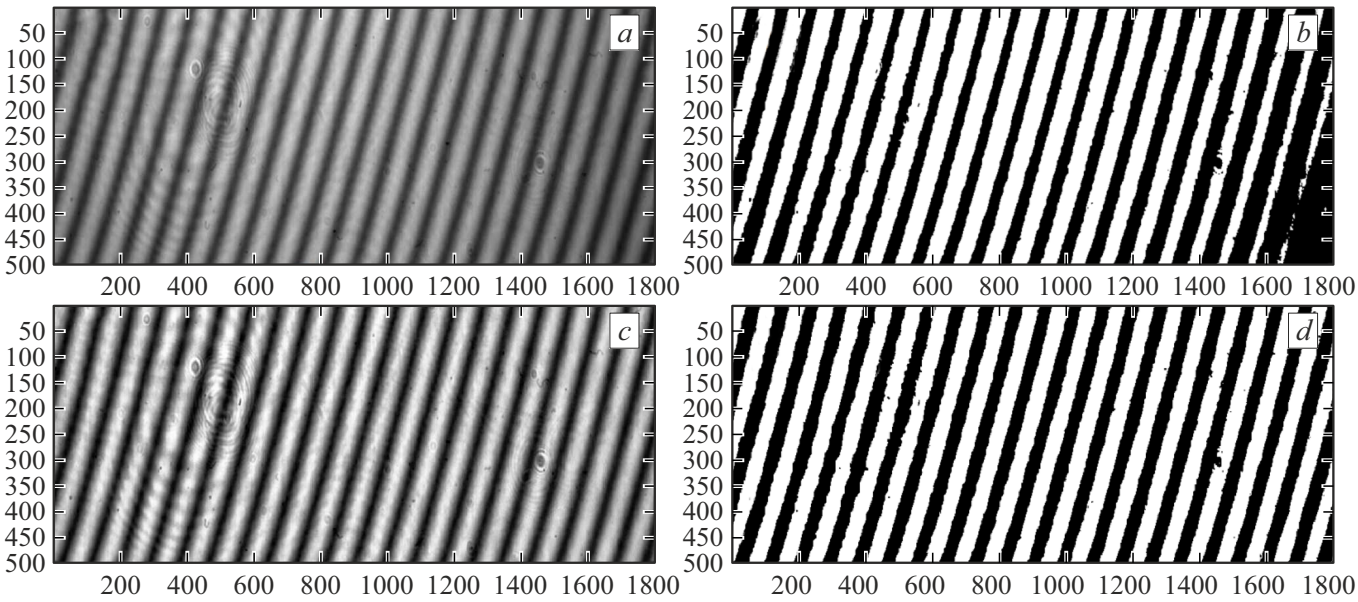

Рис. 9. Улучшение контраста на кремнии методом адаптивного выравнивания гистограмм: *a* — интерферограмма до улучшения контраста; *b* — бинаризованное изображение (*a*); *c* — интерферограмма после улучшения контраста; *d* — бинаризованное изображение (*c*).

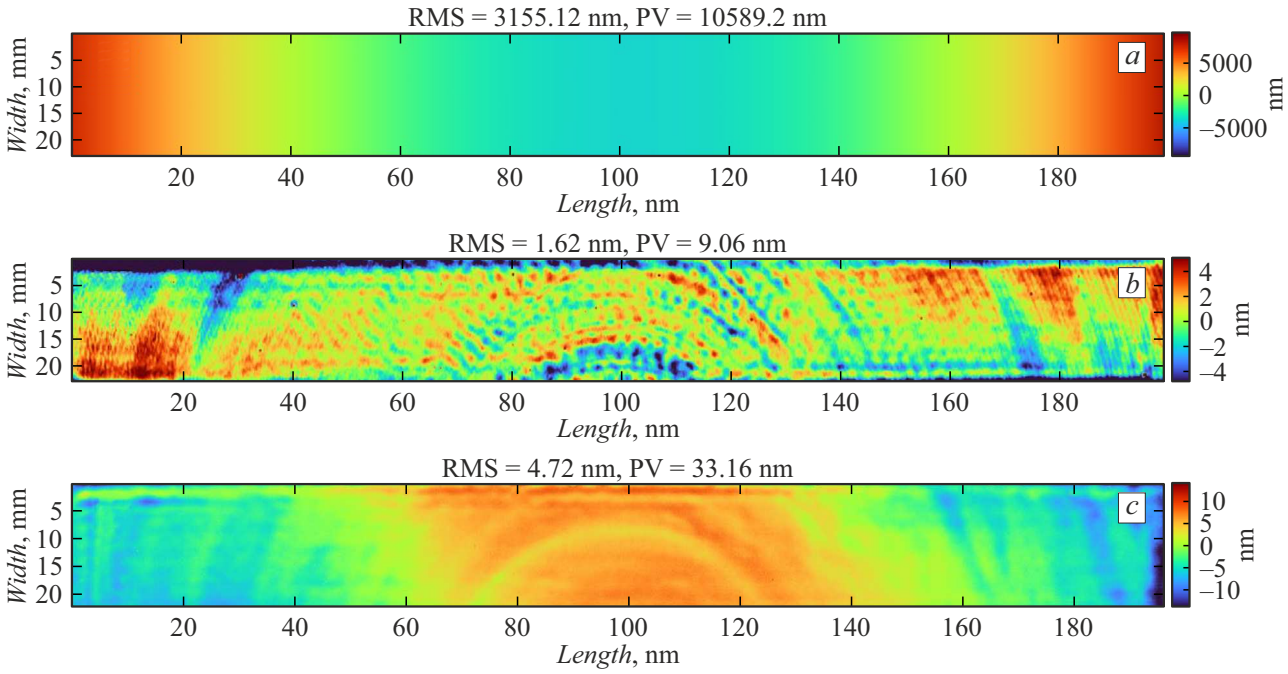

Рис. 10. *a* — результат сшивки 200 субапертур зеркала с формой эллиптического цилиндра; *b* — отклонение сшитой формы от ближайшего эллиптического цилиндра; *c* — результат сшивки 200 субапертур плоского зеркала.

фирометра в измеряемой области. Алгоритм работает с плоскими и цилиндрическими зеркалами.

3. Разработанный алгоритм выставления нуля полос позволяет минимизировать ошибку трассировки. Ее величина в наших измерениях меньше 1 nm по СКО.

4. Система виброзащиты, защиты от внешних потоков и адаптация алгоритма для работы с шаговыми двигателями без использования режима удержания позволяет проводить измерения с повторяемостью 15 pm.

5. Созданная система позволяет проводить измерения крупногабаритных плоских и цилиндрических зеркал методом сшивки субапертур, а также определять систематическую ошибку измерений методом сдвига.

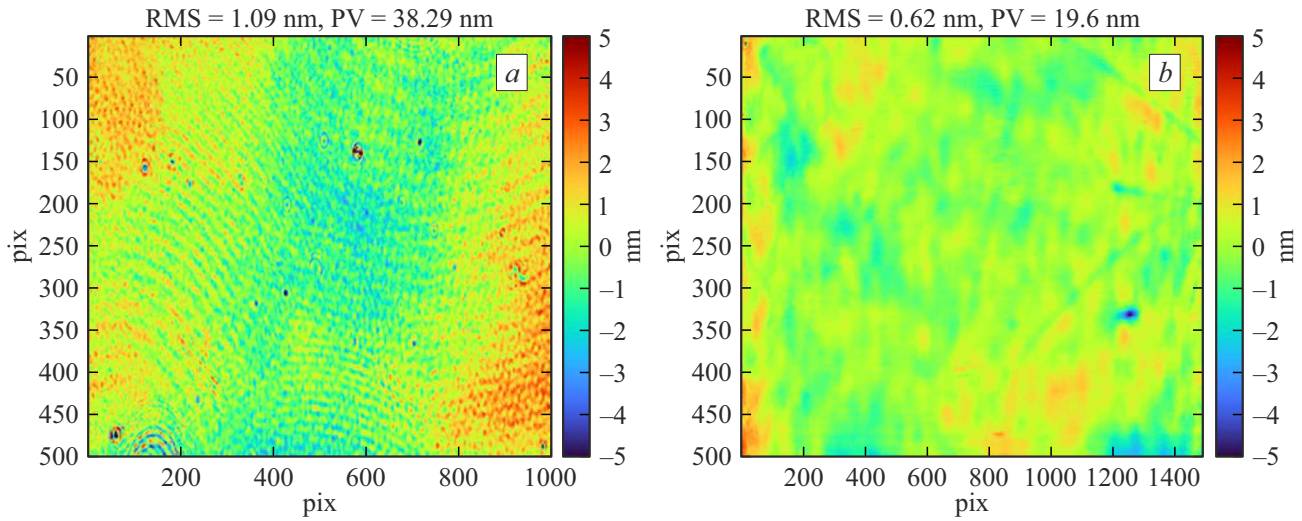

Рис. 11. Результат эксперимента по определению систематической ошибки сдвигом, 1 пиксель равен 40 μm: *a* — систематическая ошибка; *b* — измеряемое зеркало.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Wang, F. Xie, S. Ma, L. Dong. Opt. Lasers Engin., **93**, 164 (2017). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2017.02.004
[2] A. Vivo, B. Lantelme, R. Baker, R. Barrett. Rev. Sci. Instrum., **87** (5), 051908 (2016). DOI: 10.1063/1.4950745
[3] M. Bray. SPIE, **3739**, 259 (1999). DOI: 10.1117/12.360153
[4] A. Rommeveaux, M. Thomasset, D. Cocco. In: *Modern Developments in X-ray and Neutron Optics* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008), p. 181–191. DOI: 10.1007/978-3-540-74561-7_10
[5] F. Siewert, T. Noll, T. Schlegel, T. Zeschke, H. Lammert. AIP Conf. Proceed., **705** (1), 847 (2004). DOI: 10.1063/1.1757928
[6] Y. Shi, X. Xu, Q. Huang, H. Wang, A. Li, L. Zhang, Z. Wang. SPIE, **10385**, 143 (2017). DOI: 10.1117/12.2273793
[7] L. Huang, J. Xue, B. Gao, M. Idir. Opt. Express, **26** (8), 9882 (2018). DOI: 10.1364/oe.26.009882
[8] H. Yumoto, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Yamauchi, H. Ohashi. Rev. Sci. Instrum., **87** (5), 051905 (2016). DOI: 10.1063/1.4950714
[9] M. Otsubo, K. Okada, J. Tsujiuchi. Opt. Engineer., **33** (2), 608 (1994). DOI: https://doi.org/10.1117/12.152248
[10] I. Powell, E. Goulet. Appl. Optics, **37** (13), 2579 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.002579
[11] P.B. Keenan. SPIE, **429**, 2 (1983). DOI: 10.1117/12.936333
[12] B.S. Fritz. Opt. Engineer., **23** (4), 379 (1984). DOI: 10.1117/12.7973304
[13] A. Kochetkov, A. Shaykin, I. Yakovlev, E. Khazanov, A. Cheplakov, B. Wang, Y. Jin, S. Liu, J. Shao. Opt. Express, **33** (6), 13673 (2025). DOI: 10.1364/OE.551097
[14] G. Zhou, J. Wang, W. Lei, X. Dong, J. Wang. Appl. Optics, **63** (8), 2086 (2024). DOI: 10.1364/AO.516190
[15] Z. Guang, L. Weizheng, D. Xiaohao, W. Jie. Laser Optoelectron. Progress, **60** (23), 2312001 (2023). DOI: 10.3788/LOP222992
[16] E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, A.K. Chernyshev, E.I. Glushkov. Opt. Engineer., **63** (11), 114104-1 (2024). DOI: 10.1117/1.OE.63.11.114104
[17] Я.В. Зубавичус. *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов „СКИФ“. Т. 1. Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс* (Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 2022)
[18] Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, Е.И. Глушков, А.С. Гоголев, М.В. Горбачев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, И.П. Долбня, С.В. Ращенко, В.А. Чернов, Н.И. Чхало, М.Р. Шарафутдинов. Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, **336** (5), 229 (2025). DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122
[19] V.A. Chernov, I.A. Bataev, Y.V. Rakshun, Y.V. Khomyakov, M.V. Gorbachev, A.E. Trebushinin, N.I. Chkhalo, D.A. Krasnorutskiy, V.S. Naumkin, A.N. Sklyarov, N.A. Mezentsev, A.M. Korsunsky, I.P. Dolbnya. Rev. Sci. Instrum., **94** (1), 013305 (2023). DOI: 10.1063/5.0103481
[20] S.V. Rashchenko, M.A. Skamarokha, G.N. Baranov, Y.V. Zubavichus, I.V. Rakshun. AIP Conf. Proceed., **2299** (1), 060001 (2020). DOI: 10.1063/5.0030346
[21] Н.И. Чхало, С.А. Гарахин, И.В. Малышев, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.Н. Салащенко, Б.А. Уласевич, Я.В. Ракшун, В.А. Чернов, И.П. Долбня, С.В. Ращенко. ЖТФ, **92** (8), 1261 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52794.100-22
[22] E.I. Glushkov, I.V. Malyshev, E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, Yu.V. Khomyakov, Ya.V. Rakshun, V.A. Chernov, I.P. Dolbnya. J. Surf. Investig., **17** (1), S233 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070133
[23] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.standa.lt/

[24] M. Erlong, G. Yongqiang. Acta Optica Sinica, **31** (12), 1212008 (2011). DOI: 10.3788/aos201131.1212008
[25] A. Vivo, R. Barrett. SPIE, **10385**, 149 (2017). DOI: 10.1117/12.2274745
[26] P. de Groot. Appl. Opt., **44** (33), 7062 (2005). DOI: 10.1364/AO.44.007062
[27] C.B. Kreischer. SPIE, **8884**, 189 (2013). DOI: 10.1117/12.2029324
[28] A. Erko, M. Idir, T. Krist, A. Michette. In: *Modern developments in X-ray and neutron optics*, **137** (Springer, Berlin, 2008), DOI: 10.1007/978-3-540-74561-7
[29] N. Otsu. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, **9** (1), 62 (1979). DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076
[30] K. Zuiderveld. *Graphic Gems. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (Academic Press Professional, San Diego, 1994), p. 474–485. DOI: 10.1016/B978-0-12-336156-1.50061-6
[31] M.B. Da Silva, S.G. Alcock, I.T. Nistea, K. Sawhney. Opt. Lasers in Engineer., **161**, 107192 (2023). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107192
[32] H. Yumoto, S. Matsuyama, H. Mimura, K. Yamauchi, H. Ohashi. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **710**, 2 (2013). DOI: 10.1016/j.nima.2012.10.126