

УДК 681.787

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ ВНИИОФИ

Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев

*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
119361, Москва, ул. Озёрная, 46
E-mail: vish@vniiofi.ru*

Дан обзор современной аппаратуры для автоматизированных интерференционных измерений, разработанной во ФГУП «ВНИИОФИ». Представлены три типа интерференционных микроскопов, основанных на схемах интерферометра Линника, Тваймана — Грина и Физо с использованием метода фазовых шагов.

Ключевые слова: интерферометр, интерферометр Линника, интерференционный микроскоп, метод фазовых шагов.

DOI: 10.15372/AUT20170513

Введение. Основной задачей повышения точности интерференционных измерений является расшифровка интерферограмм, которая до недавнего времени производилась визуально оператором. При этом достигаемая погрешность составляла $\lambda/10$ (λ — длина волны излучения). С появлением персональных компьютеров, систем регистрации и оцифровки изображений также активно стали развиваться алгоритмы математической обработки интерференционных сигналов [1]. Применение этих алгоритмов позволяет достигать погрешности измерения $\lambda/5000$. Начиная с 70-х годов прошлого столетия во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) начались работы по цифровой обработке результатов интерференционных и голографических измерений. Были созданы автоматизированные интерферометры для измерения микроструктуры и формы поверхности объектов различных размеров.

Для автоматизации процесса расшифровки интерферограмм также было разработано собственное программное обеспечение (ПО) WinPhast [2], используемого в составе всех интерферометров. Это программное обеспечение реализует метод «фазовых шагов» [1], суть которого заключается в том, что необходимо зарегистрировать несколько интерферограмм, отличающихся фазой опорного пучка. Изменения фазы можно достичь, например, меняя оптическую длину пути пучка в опорном плече интерферометра с помощью механического сдвига зеркала (пьезоэлемента), установленного на пьезоприводе [3].

Разработанные приборы для интерференционных измерений можно разделить на два класса по размеру исследуемых объектов: интерференционные микроскопы для измерения микрообъектов или малых участков больших объектов и интерферометры для измерения макрообъектов.

Цель данного обзора — представление современной аппаратуры для автоматизированных интерференционных измерений, разработанной во ВНИИОФИ.

Интерференционные микроскопы предназначены в первую очередь для измерения параметров шероховатости и микроструктуры отражающих поверхностей, а также двумерного и трёхмерного пространственных распределений показателя преломления прозрачных микрообъектов, например живых биологических клеток, оптических волокон, микролинзовых растров и т. п.

Первый автоматизированный микроинтерферометр МИА-1М был разработан на базе микроскопа Линника МИИ-4М, который серийно выпускается АО «ЛОМО» (Санкт-Петербург). Для реализации метода дискретного фазового сдвига штатный узел крепления и юстировки опорного зеркала заменён новой конструкцией с пьезозеркалом. Для увеличения длины когерентности и достижения возможности исследования прозрачных фазовых объектов штатный осветитель был заменён лазерным, излучение которого пропускать через вращающийся диффузор для устранения спекл-шума.

Интерференционные картины при различных положениях пьезозеркала регистрируются с помощью встроенной цифровой ПЗС-камеры, оцифровываются и передаются в компьютер, где производится их автоматическая обработка. В результате восстанавливается оптическая разность хода, соответствующая измеряемому профилю поверхности (отражающих объектов) или деформации волнового фронта (пропускающих объектов). Для расширения диапазона измеряемых высот в микроскопе реализован двухволновый метод, когда объект измеряется на двух близких длинах волн. Микроскоп МИА-1М внесён в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (ранее Государственный реестр средств измерений) под № 48171-11. Примеры изображений, восстановленных из интерферограмм, полученных на приборе МИА-1М, приведены на рис. 1. На данном приборе была достигнута высокая чувствительность (до 2 \AA) при измерении высоты профиля отражающей поверхности подложек лазерных зеркал [4, 5]. Другие технические характеристики микроскопа МИА-1М можно найти в [6]. Надо отметить, что на базе микроскопа Линника также был разработан отечественный автоматизированный интерференционный микроскоп-профилометр, реализующий технику так называемой интерферометрии «белого света» [7].

Неинвазивность оптических измерений позволяет применять интерференционные микроскопы в биологических исследованиях для изучения живых клеток, являющихся нестационарными (динамическими) фазовыми объектами. Получаемое на микроскопе пространственное распределение разности хода (фазовое изображение) и его изменение во времени несёт информацию о структуре и динамических процессах в клетке [8]. Сложность исследования динамических фазовых объектов заключается в том, что для реализации метода фазовых шагов требуется зарегистрировать несколько интерференционных изображений в течение короткого промежутка времени. Для обеспечения высокой точности

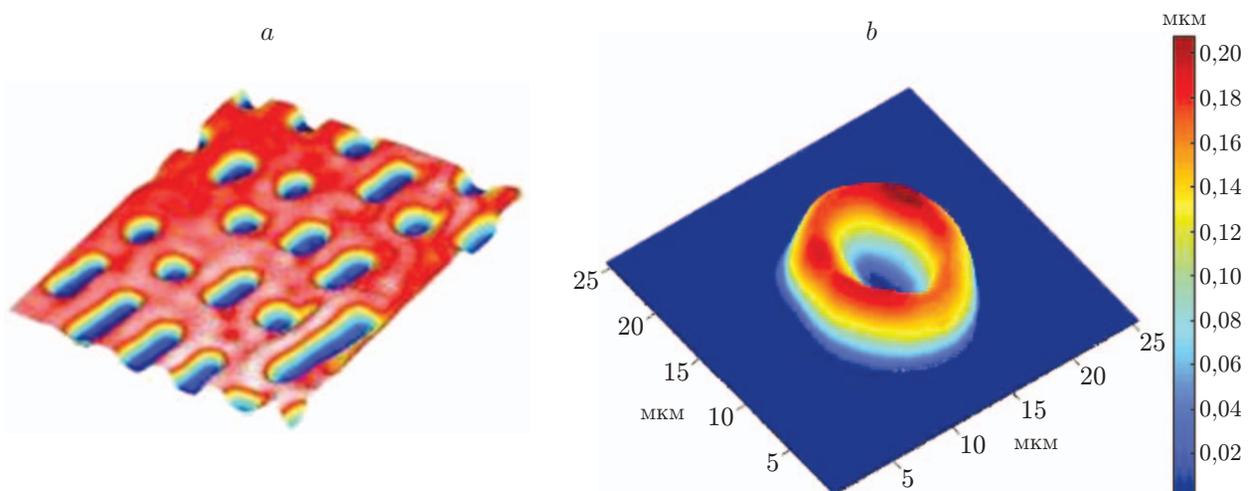


Рис. 1. Иллюстрации изображений, полученных на интерферометре МИА-1М: *a* — топограмма поверхности участка CD-диска, *b* — фазовое изображение эритроцита

фазовых изображений необходимо захватывать не менее 10 интерферограмм, поэтому для скорости реконструкции 30 фазовых изображений в секунду частота захвата интерференционных изображений должна составлять не менее 300 кадров в секунду.

Для динамического режима работы нужно непрерывное смещение опорного зеркала, которое реализовано в микроскопе МИА-Д, созданном также на основе микроинтерферометра Линника МИИ-4М [9] (рис. 2). В его состав входит интерференционный микроскоп 2, оптическая схема которого состоит из объективов 8, 14, микрообъективов 10, 12 и светоделиителя 9. В качестве фотоприёмника используется высокоскоростная камера с большой частотой захвата изображений 15 и фазосдвигающее устройство на основе пьезоактюатора 11, позволяющее осуществлять непрерывный сдвиг зеркала опорного канала. В состав прибора также входит осветительный блок 1, включающий в себя источник монохроматического света — лазер 4, вращающийся диффузор 6 и схему управления 5. В интерферометр оптическое излучение поступает по световоду 7. Объект исследования располагается на предметном зеркале 13. Управление работой устройства происходит с помощью компьютера 3. На рисунке также представлен вид сигнала, подаваемого на пьезоэлемент опорного зеркала 16.

Для записи изображений была использована скоростная камера FastVideo 300 (ООО «НПО Астек», Москва). Она имеет КМОП-матрицу размера 600×800 пикселей и позволяет записывать кадры с частотой 300 Гц. Захват изображений и сдвиг пьезоактюатора осуществлялись независимо. Для управления прибором было модернизировано штатное ПО скоростной камеры FastVideoLab, а также создано специальное ПО WinPhast-D, предназначенное для управления захватом изображений с помощью видеокамеры, обработки записанных интерферограмм и визуализации результатов.

Зависимость между напряжением и сдвигом определяется конкретным типом пьезоактюатора и может носить нелинейный характер, что приводит к неравномерности фазового сдвига при линейном изменении напряжения, подаваемого на пьезоактюатор. Поэтому в ПО динамического микроскопа МИА-Д предусмотрено определение величины фазовых

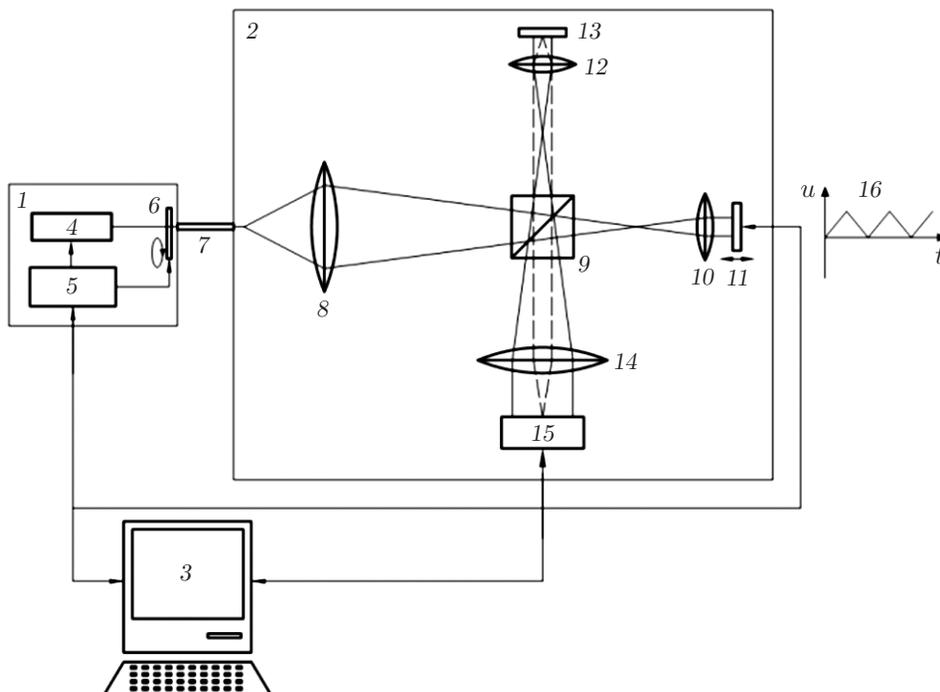


Рис. 2. Структурная схема динамического интерференционного микроскопа МИА-Д

сдвигов между каждой парой интерференционных изображений по самим интерферограммам. Для этого используется метод, основанный на фурье-преобразовании [10]. Фазовый сдвиг между интерферограммами определяется по разности аргументов комплексного числа в центре +1-го или –1-го порядка фурье-спектра интерферограммы. Данный метод накладывает ограничения на количество полос на интерферограмме, которое должно быть достаточным для того, чтобы разделились +1-й и –1-й порядки в фурье-плоскости. Для устранения этого недостатка нами был модернизирован метод, позволяющий определять величину сдвига по дисперсии разности двух интерферограмм [11].

Технические характеристики микроскопа МИА-Д можно найти в [12]. Микроскоп прошёл испытания для утверждения типа и внесён в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под № 48172-11.

Описанные выше интерференционные микроскопы основаны на коммерческом микроскопе МИИ-4. Первоначально этот микроскоп был предназначен для измерения параметров шероховатости отражающих изделий, которые укладывались на предметный столик исследуемой поверхностью вниз, что не всегда удобно, особенно для прецизионных оптических деталей, например подложек лазерных зеркал. Ещё один недостаток конструкции МИИ-4 заключается в том, что фокусировка на поверхность изделия осуществляется перемещением микрометрическим винтом всего оптико-механического блока интерферометра относительно неподвижного предметного столика, расположенного на корпусе микроинтерферометра. Это приводит к тому, что под тяжестью блока интерферометра происходит его медленное смещение вдоль оптической оси, что ведёт к расфокусировке изображения исследуемой поверхности. Следовательно, длительные измерения на микроскопе проводить нельзя. Невозможность смены микрообъективов для получения различного увеличения также является недостатком микроскопа МИИ-4. Поэтому нами был разработан новый интерференционный микроскоп МИА-2, в котором устранены перечисленные выше недочёты. Микроскоп также построен по схеме Линника, но по отношению к МИИ-4 оптическая схема МИА-2 является инвертированной, т. е. объект укладывается на предметный столик исследуемой поверхностью вверх, как в обычном микроскопе. Фокусировка осуществляется перемещением трёхкоординатного предметного столика с объектом в вертикальном направлении. Интерферометр собран на вертикальной плите, и его элементы крепятся к плите с помощью кронштейнов. В результате оптическая ось микроскопа расположена всего в 35 мм от плиты, что задаёт жёсткость его конструкции и хорошую защиту от вибраций. Все элементы микроскопа закреплены с помощью кейдж-системы (cage — каркас) фирмы Thorlabs размером 30 мм, что позволяет легко центрировать и юстировать эти элементы относительно друг друга.

В качестве источника излучения в микроскопе МИА-2 используется светодиодный осветитель. Изображение светящейся площадки светодиода строится с помощью двух ахроматических линз в плоскости ирисовой диафрагмы, играющей роль апертурной диафрагмы. Рядом с ней расположена такая же полевая диафрагма. Изображение апертурной диафрагмы с использованием линзы строится в задней фокальной плоскости микрообъективов: предметного и опорного. Деление света на два пучка осуществляется с помощью светоделительного кубика. Используемые микрообъективы должны быть идентичными по всем параметрам (увеличению, числовой апертуре), но конструкция микроскопа позволяет их попарную смену, например, на микрообъективы с другим увеличением. Пучок света отражается от предмета и опорного зеркала и, пройдя через светоделитель и проекционный объектив, попадает на видеокамеру «Видеоскан 285 USB», которая регистрирует интерференционную картину. Для применения метода фазовых шагов в опорном канале используется горизонтальный предметный столик, на котором закреплена сборка из микрообъектива и опорного зеркала. Такое зеркало представляет собой супергладкую кремниевую пластинку, шероховатость которой составляет $0,5 \text{ \AA}$, изготовленную по па-

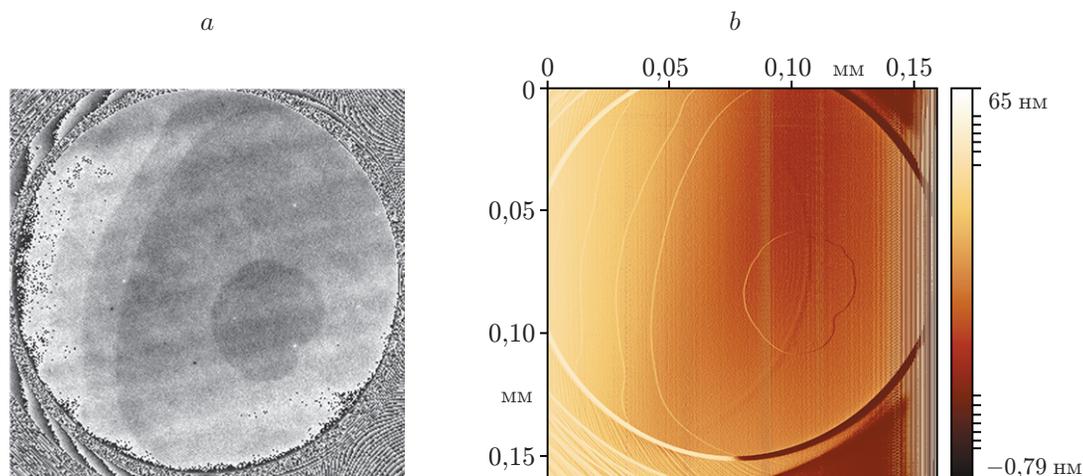


Рис. 3. Топограммы моноатомных слоёв кремния: *a* — полученные на микроскопе МИА-2, *b* — на атомно-силовом микроскопе

тентованной технологии Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск) [13, 14]. Экспериментальные исследования на МИА-2 подтвердили его высокую чувствительность к изменениям высоты микрорельефа. Размер поля зрения составляет 150×150 мкм, высота моноатомного слоя — $3,14 \text{ \AA}$ (рис. 3).

Интерферометры. Интерферометр ПИК-30М (рис. 4) предназначен для измерения относительных высот профиля поверхности (топограмм) полированных изделий, в том числе подложек сферических зеркал, диаметр которых не превышает 30 мм, а радиус кривизны лежит в диапазоне от 2 до 7 м. Благодаря сменному опорному зеркалу в интерферометре ПИК-30М можно измерять полированные изделия без зеркального покрытия, коэффициент отражения которых не менее 4 %. Все элементы интерферометра закреплены с помощью кейдж-системы на вертикальной плите, установленной на сотовом столе. Конструкция интерферометра ПИК-30М позволяет также измерять поверхность крупногабаритных деталей (до 150 мм) на участках размером до 30 мм.

Интерферометр обладает: высокой точностью (более $\lambda/3000$) измерения параметров оптических элементов диаметром до 30 мм, автоматизацией процесса проведения измерений, низкой чувствительностью к вибрациям, простотой и лёгкостью в эксплуатации, малыми габаритами.

В основе прибора лежит оптическая схема интерферометра Тваймана — Грина. Отличительной особенностью оптической схемы по сравнению с первоначальной версией прибора [15] является наличие вращающегося диффузора 3, который используется для уменьшения когерентных шумов и повышения качества интерферограмм. Диффузор установлен на расстоянии 6 см от линзы 5 коллиматора. Благодаря малому диаметру входного отверстия линзы (около 4 мм) пространственная когерентность излучения сохраняется.

Прибор состоит из двух частей: интерферометра и блока управления и обработки информации. Оптическая схема интерферометра включает: He—Ne-лазер 1, поворотные призмы 2, 4, вращающийся диффузор 3, линзы коллиматора 5, 6, светоделительный клин 7, измеряемый объект 8, опорное зеркало 9, светофильтр 10, объектив 11, ПЗС-камеру 12, зеркало с пьезопреобразователем 13. Компьютерная расшифровка интерферограмм производится по методу дискретного фазового сдвига, вносимого плоским зеркалом, сдвигаемым пьезоэлементом. В результате обработки интерферограмм восстанавливается двумерная карта высот профиля поверхности объекта (топограммы) относительно начальной точки, выбираемой оператором. Программное обеспечение по полученным топограммам позволяет вычислять радиус кривизны сферических поверхностей, среднее квадратическое откло-

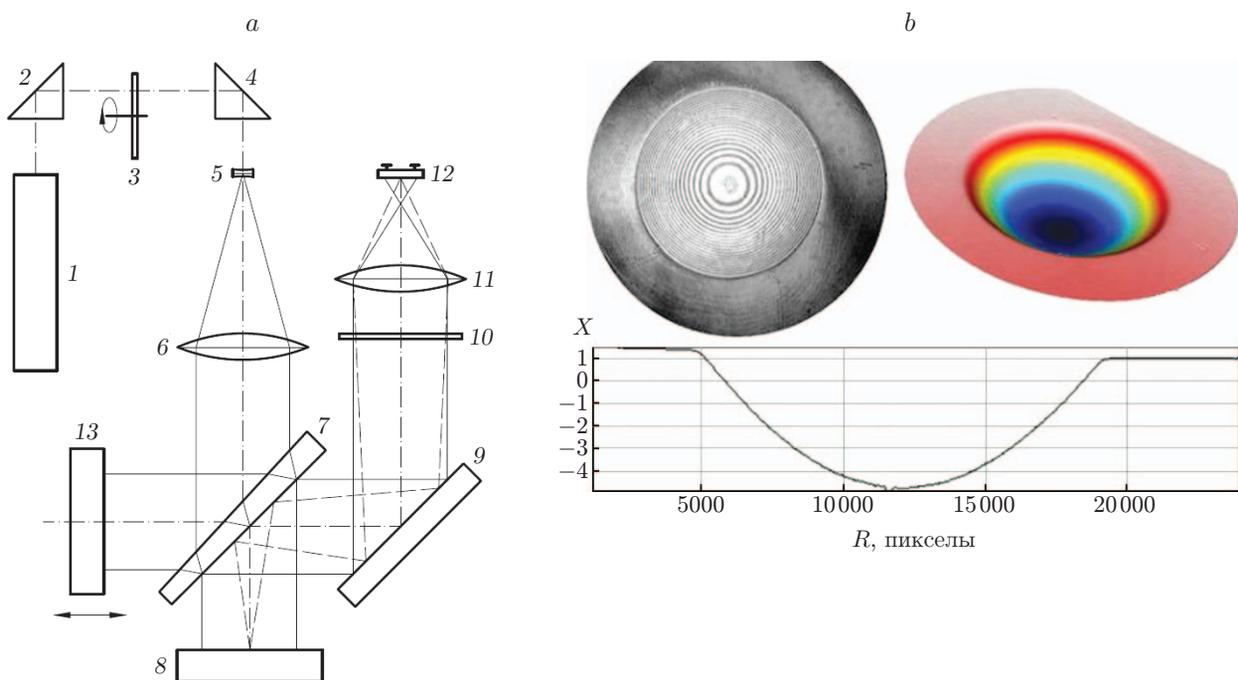


Рис. 4. Измерение высот профиля поверхности изделий: *a* — оптическая схема интерферометра ПИК-30М, *b* — результат измерения топограммы подложки лазерного зеркала

нение и предельное отклонение измеренной топограммы от плоской и сферической поверхностей, «децентрировку» сферической поверхности относительно геометрического центра подложки сферического зеркала в диапазоне от 0,1 до 5,0 мм.

Пример измеренного профиля поверхности подложки сферического лазерного зеркала приведён на рис. 4, *b*. Подробные технические характеристики прибора можно узнать в [16]. Интерферометр внесён в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под № 48169-11.

Для исследования крупногабаритных оптических деталей или волновых фронтов часто используют схему интерферометра Физо, например в широко известных интерферометрах фирмы Zygo, а также отечественном интерферометре ФТИ-100 совместной разработки Института автоматики и электрометрии СО РАН и ЗАО «Дифракция» (г. Новосибирск) [17]. Во ВНИИОФИ также создан программно-аппаратный комплекс ИФА-300, предназначенный для автоматизации измерений на интерферометрах, построенных по схеме Физо, а также применения для измерений отклонений от сферичности и плоскостности прецизионных поверхностей оптических деталей и оптических систем. Комплекс состоит из источника излучения, блока управления и ПО. Источником излучения служит диодный лазер с внешним резонатором и коллимирующим объективом.

В комплексе ИФА-300 для автоматической расшифровки интерферограмм реализован метод фазовых шагов. Сдвиг полос осуществляется не за счёт механического сдвига опорного элемента, а путём изменения длины волны излучения [3, 18], так как трудно выполнить прямолинейное движение крупногабаритных оптических элементов интерферометра без перекосов. В качестве источника излучения, перестраиваемого по длине волны в видимой области оптического спектра, используется отечественный диодный лазер с внешним резонатором модели ECDL-6415R фирмы VitaWave или перестраиваемый диодный лазер VortexPlus TLB-6804-P фирмы NewFocus, входящей в корпорацию Newport (США). Комплекс ИФА-300 с лазером ECDL-6415R применяется для автоматизации интерферометра Физо в составе Государственного первичного специального эталона единицы длины отклонений от плоскостности оптических поверхностей размером до 200 мм ГЭТ 183-2010 [18].

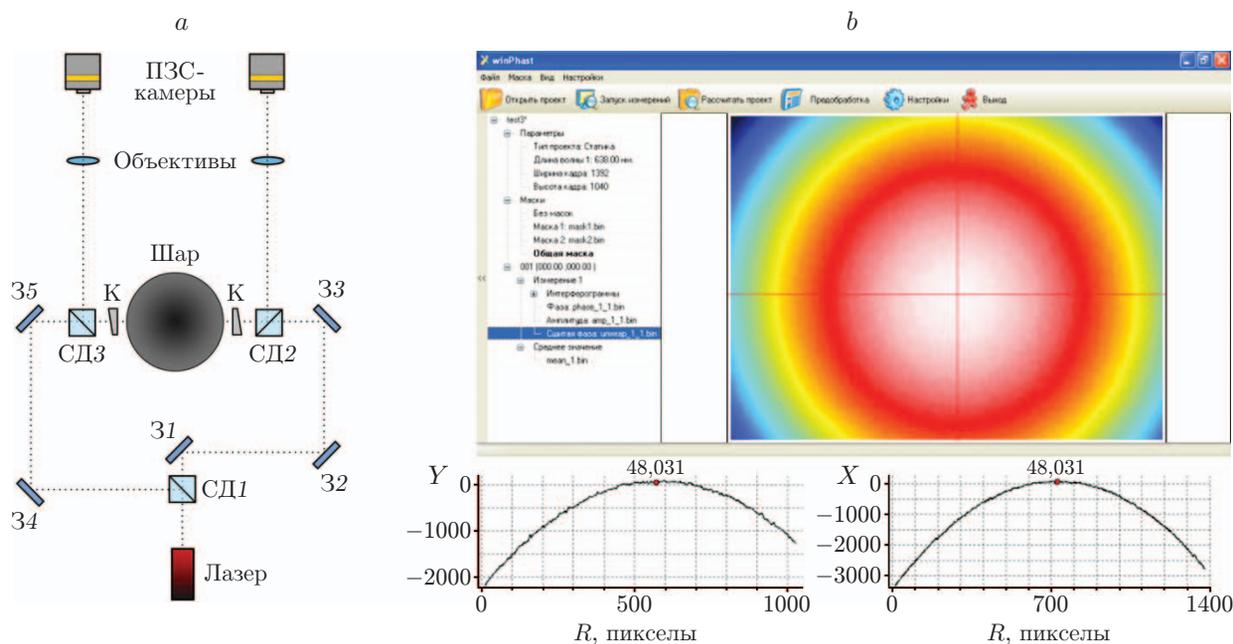


Рис. 5. Бесконтактное измерение: *a* — оптическая схема, *b* — топограмма поверхности шара

Экспериментальный образец комплекса с лазером VortexPlus TLB-6804-P был использован в составе интерферометра Саундерса, предназначенного для бесконтактных измерений диаметра и объёма кремниевого шара по международной программе «Авогадро» (рис. 5, *a*) [19]. Исследуемый объект в форме шара помещается внутрь интерферометра Фабри — Перо, образованного плоскими эталонными поверхностями оптических клиньев (К). В результате возникают два неравноплечных интерферометра Физо, образованных эталонными зеркалами основного интерферометра Фабри — Перо и поверхностью шара. На рис. 5, *a* СД1–3 — светоделительные кубики, 31–5 — поворотные зеркала.

Две системы интерференционных полос (колец Ньютона) образуются световыми пучками, отражёнными от поверхности шара и ближайшей эталонной плоскости. Для анализа интерференционных полос и реконструкции формы поверхности шара в интерферометре реализуется метод фазовых шагов путём изменения длины волны лазерного излучения. Для достижения фазового шага 2π радиан (смещение на одну интерференционную полосу) требуется сдвиг частоты излучения на величину 5 ГГц для интерферометра Фабри — Перо с базовым расстоянием 30 мм. Такой сдвиг частоты приводит к изменению длины волны излучения всего на 0,007 нм, что никак не сказывается на погрешности измерения диаметра шара. Топограмма поверхности шара приведена на рис. 5, *b*.

Заключение. Созданный на протяжении многих лет параметрический ряд интерференционных приборов ВНИИОФИ позволяет исследовать широкий класс объектов размером от нескольких микрон с субнанометровой чувствительностью по высоте поверхности до оптических деталей диаметром 300 мм с нанометровой точностью измерений отклонений от плоскости.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники [20], созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голография.** Методы и аппаратура /Под ред. В. М. Гинзбург, Б. М. Степанова. М.: Сов. радио, 1974. 376 с.

2. Корженевич Е. Л., Левин Г. Г. Расшифровка электронных спекл-интерферограмм в условиях сильных шумов // Оптика и спектроскопия. 1996. **81**, № 1. С. 149–152.
3. Optical Shop Testing /Ed. D. Malacara. Wiley-VCH, 1992. 792 p.
4. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л., Цельмина И. Ю. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Численное моделирование // Оптика и спектроскопия. 2013. **115**, № 6. С. 1039–1046.
5. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л., Цельмина И. Ю. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Экспериментальные исследования // Оптика и спектроскопия. 2014. **116**, № 1. С. 170–175.
6. Микроскоп интерференционный автоматизированный МИА-1М (микропрофилометр). URL: <http://www.vniiofi.ru/depart/m44/microfil.html> (дата обращения: 23.05.2017).
7. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В. и др. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. 2010. **46**, № 2. С. 119–128.
8. Тычинский В. П. Когерентная фазовая микроскопия внутриклеточных процессов // Успехи физических наук. 2001. **171**, № 6. С. 649–662.
9. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Автоматизированный интерференционный микроскоп для измерения динамических объектов // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 1. С. 79–84.
10. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // JOSA. 1982. **72**, Is. 1. P. 156–160.
11. Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N. Advanced method of phase shift measurement from variances of interferogram differences // Appl. Opt. 2015. **54**, N 15. P. 4797–4804.
12. Микроскоп интерференционный автоматизированный (динамический) МИА-Д. URL: <http://www.vniiofi.ru/depart/m44/mia-d.html> (дата обращения: 23.05.2017).
13. Щеглов Д. В., Косолобов С. С., Федина Л. И. и др. Высокоточные меры линейных размеров в нанодиапазоне // Российские нанотехнологии. 2013. **8**, № 7–8. С. 84–94.
14. Пат. 2371674 РФ. Способ изготовления ступенчатого высотного калибровочного стандарта для профилометрии и сканирующей зондовой микроскопии /Д. В. Щеглов, С. С. Косолобов, Е. Е. Родякина, А. В. Латышев. Оpubл. 27.10.2009; Бюл. № 30.
15. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л., Цельмина И. Ю. Интерферометр фазового сдвига для контроля плоских и сферических оптических деталей // Оптический журнал. 2013. № 5. С. 76–82.
16. Профилометр интерференционный компьютерный ПИК-30М. URL: <http://www.vniiofi.ru/depart/m44/pik-30.html> (дата обращения: 23.05.2017).
17. Полещук А. Г., Хомутов В. Н., Маточкин А. Е. и др. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей // Фотоника. 2016. № 4. С. 38–50.
18. Вишняков Г. Н., Золотаревский С. Ю., Новиков Д. А. Измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии Физо // Метрология. 2012. № 12. С. 17–24.
19. Azuma Y., Barat P., Bartl G. et al. Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal // Metrologia. 2015. **52**. P. 360–375.
20. Центр коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники. URL: <http://www.ckp.vniiofi.ru/> (дата обращения: 23.05.2017).