

Эталонные средства измерений в оптической интерферометрии высокого разрешения

Н. Н. МОИСЕЕВ*, С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: moiseev@vniiofi.ru

**Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия

Рассмотрен комплекс эталонных средств измерений в составе набора эталонных мер высоты ступеньки и величины периода, предназначенных для трехмерной калибровки контрольно-измерительного оборудования на основе интерференционных оптических и сканирующих зондовых микроскопов, применяемых для измерения малых расстояний.

Ключевые слова: эталонные меры высоты ступеньки, калибровка, профилометр, нанометр.

The complex of standard measuring instruments in composition of a set of standard measures of values of height of step and value of period intended for the three-dimensional calibration of test equipment based on interference optical microscopes and scanning probe microscopes used for measurement of small distances is considered.

Key words: step height standard, calibration, profilometer, nanometer.

В настоящее время оптическая интерферометрия широко используется в различных областях науки, техники, медицины, биологии и т. д. — там, где требуется измерять чрезвычайно малые расстояния [1—3]. Современные промышленные интерферометры имеют настолько низкий уровень инструментальных погрешностей, что с их помощью возможно измерять и фиксировать в аксиальном направлении изменения расстояний, величина которых составляет тысячные доли длины волн.

В ходе измерений, как известно, имеют место случайные и систематические погрешности измерений. Случайные погрешности количественно оцениваются статистическими методами и могут быть минимизированы многократным повторением измерений. Систематические погрешности не выявляются таким образом, только калибровка и поверка могут помочь их обнаружить и учесть при определении результатов измерений.

Основные источники систематических погрешностей — ошибки масштабирования, аберрации оптической системы и погрешности (шероховатость и волнистость) опорного зеркала интерферометра. Проверку и корректировку коэффициентов масштабирования осуществляют с помощью эталонных мер высоты неровности рельефа (выполненных, как правило, в виде одиночных ступенек заданной высоты) и величины периода (имеющих вид периодической системы выступов или канавок, сформированных на поверхности эталонной меры). Оптические аберрации и погрешности опорного зеркала выявляются и корректируются с помощью эталонных поверхностей, имеющих высокую плоскостность и малую шероховатость. Как показывает опыт работы со сканирующим интерференционным микроскопом белого света типа NewView 6200 фирмы ZYGO и одночастотным интерференционным автоматизированным микроскопом МИА-1, изготовленным во ВНИИОФИ на основе микроинтерферометра МИИ-4 производства ЛОМО (С.-Петербург), эталоны

указанных выше типов позволяют проводить качественные интерферометрические измерения.

В соответствии с изложенным во ВНИИОФИ сформирован следующий набор эталонных мер:

меры рельефные высоты ступеньки SHS-1.8QC, SHS-1800QC и SHS-180QC, предназначенные для калибровки и поверки профилометров в продольном направлении (по оси Z);

мера периода и глубины профиля поверхности STS3-180P, предназначенная для калибровки микроскопов в поперечной плоскости (по осям X, Y).

Перечисленные меры прошли испытания во ВНИИМС и включены в состав вторичного эталона в области измерения параметров шероховатости поверхности ВЭТ 113-2-09.

Определение систематических погрешностей измерений профиля поверхности осуществляется с помощью прецизионной опорной пластины фирмы ZYGO Corp. Использование этой пластины критично при исследовании суперплоских поверхностей с очень малой шероховатостью со среднеквадратичным значением, составляющим единицы и доли ангстрема.

Меры высоты неровности рельефа выполнены в виде кварцевых блоков, хранящихся в специальных кейсах. В центре каждого блока находится рабочая зона площадью около 1 см². В этой зоне сформирована рельефная структура, состоящая из набора элементов правильной геометрической формы, покрытых слоем хрома (см. рис. 1). Основным элементом структуры является сертифицируемый элемент — ступенька или канавка. Характеристики мер высоты ступеньки приведены в табл. 1. Значения высоты определяются на основе усреднения по большим участкам поверхности, выбранным на достаточном удалении от границ ступенек.

Мера периода и глубины профиля поверхности STS3-180P представляет собой пластину размером 10 × 8 мм, состоящую из кремниевой подложки и рельеф-

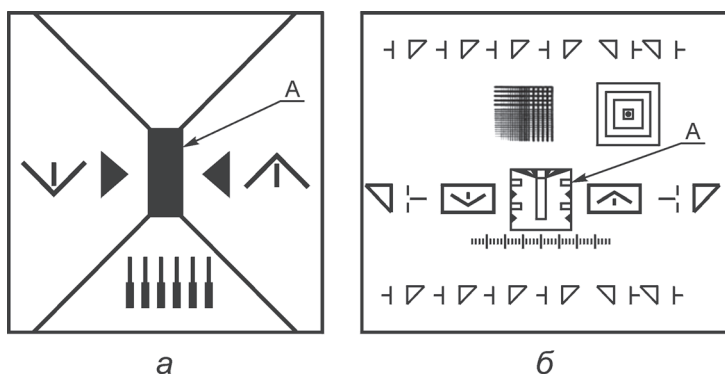


Рис. 1. План рельефной структуры, сформированной на поверхности мер высоты неровности рельефа: а — мера SHS-1.8QC; б — меры SHS-1800QC и SHS-180QC. А — указывает на сертифицированный участок

ной структуры, сформированной на кварцевом слое и покрытой тонким слоем платины. Рельефная структура образуется тремя двумерными решетками с сертифицированными величинами средних значений периода и прилегающими к каждой решетке канавками с сертифицированными значениями глубины канавок h (см. рис. 2). Характеристики этой меры приведены в табл. 2 и 3.

Прецизионная опорная пластина изготовлена из карбида кремния SiC, выбранного из-за его повышенной твердости и износостойкости. Пластина имеет форму диска диаметром 50 мм и толщиной 5 мм; была откалибрована производителем в соответствии с утвержденной NIST методикой и с использованием сертифицированного NIST эталона плоскости. Характеристики пластины приведены в табл. 4.

Таблица 1

Характеристики мер высоты ступеньки

Характеристика	Наименование меры		
	SHS-1.8QC	SHS-1800QC	SHS-180QC
Высота ступеньки, нм	(1781 ± 11)	(179,4 ± 2)	(19,9 ± 0,8)
Площадь ступеньки, мм ²	1×2,5	0,1×0,75	0,1×0,75
Форма ступеньки	канавка	выступ	выступ
Рабочая зона, см ²	1×1	1×1	1×1
Габариты меры, мм ³	25×25×3	25×25×3	25×25×3

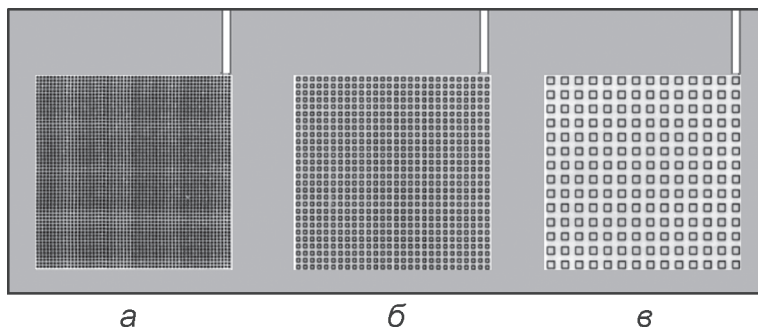


Рис. 2. План рельефной структуры меры STS3-180P: период решетки 3 мкм (а), 10 мкм (б), 20 мкм (в)

Таблица 2

Технические характеристики меры STS3-180P

Габариты меры, мм ³	12 × 8 × 3
Количество решеток	3
Размеры решетки, мкм ²	270 × 270
Материал подложки	кремний
Материал решетки	кварц, покрытый платиной
Форма профиля элемента решетки	трапеция

Таблица 3

Метрологические характеристики меры STS3-180P

Номинальный период решетки, мкм	3	10	20
Измеренное значение среднего периода, мкм	3,01±0,02	9,98±0,03	19,98±0,03
Среднее значение высоты, нм	17,9±0,03	17,1±2,1	18,2±1,9

Таблица 4

Технические характеристики прецизионной опорной пластины (по данным производителя)

Характеристика	Величина
Диаметр пластины, мм	50
Диаметр рабочей зоны пластины, мм	40
Плоскостность рабочей зоны, не хуже, нм	10
Шероховатость рабочей зоны (по SKO), не более, нм	0,1

Заключение. Рассмотренный комплекс эталонных средств измерений позволяет проводить калибровку шкалы Z оптических (бесконтактных), а также и контактных профилометров, применяемых для измерения профиля поверхности с перепадом высот в диапазоне от единиц и долей нанометра до десятков микрометров с максимальным разрешением порядка 0,1 нм. При этом погрешность абсолютных измерений перепада высоты в решающей степени определяется величиной неопределенности, с которой известна высота эталонных ступенек. Входящая в комплекс мера величины периода вместе со стандартными средствами измерения расстояний, типа объект-микрометра, позволяет с высокой точностью откалибровать поперечные размеры изображения измеряемого профиля поверхности в широком диапазоне от единиц микрометров до нескольких миллиметров.

Следует отметить, что высокое качество изготовления мер и достаточно широкий диапазон значений высоты ступенек дает возможность использовать их не только для калибровки профилометров, но и в экспериментах, связанных с решением задач по достижению сверхразрешения и измерения наноперемещений по оптическим фазовым изображениям.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (госконтракт № 16.552.11.7049 от 29.07.2011 г.).

Литература

1. ISO/TR 14999-1:2005. Optics and photonics. Interferometric measurement of optical elements and optical

systems. Part 1: Terms, definitions and fundamental relationships.

2. ISO/TR 14999-2:2005. Optics and photonics. Interferometric measurement of optical elements and optical systems. Part 2: Measurement and evaluation techniques.

3. ISO/TR 14999-3:2005. Optics and photonics. Interferometric measurement of optical elements and optical systems. Part 3: Calibration and validation of interferometric test equipment and measurements.

Дата принятия 02.05.2012 г.

543.46

Измерение радиуса кривизны и децентровки подложек лазерных зеркал на компьютерном интерференционном профилометре

Г. Н. ВИШНЯКОВ*, И. Ю. ЦЕЛЬМИНА**

*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: vish@vniiofi.ru

**Раменский приборостроительный завод, Раменское, Россия

Рассмотрена методика измерения радиуса кривизны и децентровки подложек лазерных зеркал с использованием компьютерного интерференционного профилометра ПИК-30.

Ключевые слова: интерферометр Майкельсона, метод фазовых шагов, лазерное зеркало, радиус кривизны.

The method of measuring of curvature radius and decentering of laser mirrors base plates by interferometric computer profilometer PIK-30 is considered.

Key words: Michelson interferometer, phase steps method, laser mirror, curvature radius.

Оптический контроль — важная составляющая производства оптических изделий [1]. Наиболее востребованы измерения отклонений измеряемой оптической поверхности от плоскости или сферы. Например, совершенствование лазерных гироскопов ведет к повышению требований по точности изготовления зеркал резонатора кольцевого лазера. Специфика таких зеркал заключается в большом радиусе кривизны 2 — 10 м при небольшом размере (диаметр 10 — 30 мм). Важными контролируемыми параметрами зеркал являются радиус кривизны отражающей поверхности (обычно сферы) и децентровка, т. е. величина отклонения центра кривизны отражающей поверхности относительно центра самого зеркала.

Ранее для оптического контроля использовались интерференционные приборы визуального типа, например, отечественные интерферометры серии ИТ-40, ИТ-70, ИТ-100, ИТ-200, построенные по схеме Физо [2]. Данный тип интерферометров не был автоматизирован, поэтому точность измерения не превышала $\lambda/10$, где λ — длина волны используемого излучения. В последнее время появились отечественные интерферометры с цифровой расшифровкой интерферограмм — приборы, которые по одной или нескольким интерферограммам позволяют автоматически восстановить

топограмму измеряемой поверхности. Так автоматизированный интерферометр ИКД-110 (ООО «МТПК-ЛОМО», С.-Петербург) применяется для производственного контроля плоских и сферических деталей. Однако в данном приборе для автоматической расшифровки интерферограмм используется метод скелетизации, т. е. поиск центра полос с последующей интерполяцией, который ограничен по точности вычисления фазы величиной $\lambda/50$. В другом отечественном интерферометре ФТИ-100 (ЗАО «Дифракция», Новосибирск) для автоматической расшифровки интерферограмм широко используется более современный метод фазового сдвига [3]. В результате точность реконструкции фазы возрастает до $\lambda/100$. Современные импортные интерференционные приборы, например, фирмы ZYGO, все оснащены автоматическими системами расшифровки интерферограмм, поэтому обладают высокой точностью измерений, но, к сожалению, достаточно дороги.

Все это послужило поводом к разработке нового интерферометра, удовлетворяющего следующим требованиям: высокой точности измерения (более $\lambda/100$) параметров оптических элементов диаметром до 30 мм; автоматизации измерений; низкой чувствительностью к вибрациям; простым и легким в эксплуатации программным обеспечением; малыми габаритами.