

СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

**С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ*, С. А. КОНОНОВ*, В. Г. ЛЫСЕНКО*, Г. Г.
ЛЕВИН**, В. Л. ЛЯСКОВСКИЙ**, А. С. ГУСЕВ**, С. С. ГОЛУБЕВ*****

**Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: s.zolotarevskiy@vniims.ru*

***Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических
измерений, Москва, Россия*

****Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
(РОССТАНДАРТ), Москва, Россия*

Рассмотрен механизм формирования бюджета неопределенности измерений параметров рельефа и формы поверхности в нанометровом диапазоне применительно к типовым оптическим схемам интерферометра Тваймана–Грина и Физо. Отмечено, что в большинстве известных работ реализуется дифференциальный (разностный) метод измерений. Рассмотрены амплитудный и амплитудно-фазовый интерференционные методы координатного измерения отклонения формы поверхности.

Ключевые слова: *интерферометр, характеристика и текстура поверхности, дифференциальный (разностный) метод измерений, амплитудный и амплитудно-фазовый интерференционные методы.*

The mechanism of formation of the uncertainty budget measurements of topography and shape of the surface in nanometer range applicable for the typical optical circuits of the Twyman–Green and Fizeau interferometers is considered. It is noted that in the most of known works the differential (difference) method of measurements is realized. The amplitude and the phase-amplitude interference methods of coordinate measurement of the surface shaped deflection are considered.

Key words: *interferometer, characterization and surface texture, differential (difference) measurement method, amplitude and the phase-amplitude interference methods.*

В 3D-метрии наноразмерных геометрических величин и параметров, характеризующих топографию поверхностей, наибольшее развитие и распространение к настоящему времени получили методы и средства

как электронной (ЭМ), растровой (РЗМ) и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), так и интерферометрии высокого разрешения (ИВР). Именно они обеспечивают достижение наивысшей разрешающей способности при приемлемой для рабочих средств измерений (РСИ) неопределенности измерений [1 – 3].

При этом профилометрия контактными и бесконтактными методами и средствами различных типов и назначений (включая, разумеется, ЭМ, РЗМ и СЗМ) на данном этапе развития обеспечена как инструментально (учитывая серийный выпуск измерительной аппаратуры), так и методически, поскольку широко распространена международно признанная нормативно-техническая документация на уровне стандартов и технических докладов ISO. Вместе с тем, топография и измерения текстуры поверхности в нанометровом диапазоне, требующие применения «покадровой» ареальной (или площадочной) съемки рельефа поверхности с количественной оценкой характеризующих ее признаков, нуждаются как в измерительной аппаратуре высокого разрешения, так и в гармонизированном с международными требованиями методическом обеспечении, вплоть до стандартизации методик и СИ с высоким разрешением и не худшими, чем у профильных методик и аппаратуры, точностными характеристиками [4]. Особенно важно в первую очередь упорядочить и, по возможности, унифицировать терминологию, поскольку пока нет единого мнения в определении таких терминов, как топография, текстура, рельеф и даже форма поверхности в нанодиапазоне размеров. Более того, в зарубежной литературе по этим вопросам нередко встречаются такие понятия, как ареальная поверхность, артефакт и пр. Следует отметить, что стремление к повышению быстродействия, разрешающей способности и точности измерений, совершенствованию и унификации терминологии и обеспечения прослеживаемости СИ к первичным эталонам в 3D-метрии участков поверхности и объема поверхностных нанообъектов и наноструктур стимулировало интенсивное развитие ИВР и фазовой микроскопии. Свидетельством тому служат три части фундаментального документа [5], являющегося международным стандартом в области методического обеспечения интерференционных измерений и фазовой микроскопии. В [5] речь идет о калибровочных и измерительных потребностях координатных экспрессных измерений в микро- и наноразмерных масштабах, применительно к прозрачным (фазовым) и непрозрачным для

оптического излучения объектам. Одним из наиболее эффективных подходов к решению возникающих при этом измерительных задач служит прецизионная ИВР. При измерении топографии поверхности методами и средствами прецизионной ИВР необходимо рассматривать определения не только рельефа и шероховатости, но подчас и формы поверхности, поскольку совокупность этих трех основных компонентов отображает получаемую с использованием ИВР топографическую карту поверхности. При этом необходимо задать и сохранять в процессе измерений координатную (референтную) поверхность, по нормали к которой определяются отклонения формы контролируемой поверхности [4, 6].

В настоящее время в международной теории и практике 3D-измерений утвердилось мнение о необходимости реализации любыми доступными средствами и методиками измерений разрешающей способности не хуже $\lambda / 1000$ (λ — длина волны оптического излучения в видимом или ближнем инфракрасном диапазонах спектра) при неопределенности измерений не более $10^{-7} - 10^{-9}$ и высоком быстродействии аппаратуры для получения и обработки измерительной информации. Совокупности подобных требований и критериев отвечает ИВР, причем любой из известных и ставших традиционными методов интерферометрии требует тщательной компенсации влияния внешних воздействий и технологических факторов, а также обеспечения прослеживаемости подобных интерферометров, в первую очередь к первичному эталону единицы длины — метру.

Реализацию приведенных требований рассмотрим на примере наиболее типичной схемы интерферометра Тваймана–Грина, представленной на рис. 1. Оптическая система интерферометра проецирует волновой фронт E_1 , сформированный из лазерного пучка на эталонную поверхность номинальной формы S_1 . Одновременно плоскопараллельная пластина проецирует волновой фронт E_2 , отраженный от контролируемой поверхности S_2 , имеющей одинаковую с эталонной номинальную форму, но содержащую отклонения от нее $\varphi_2(x, y)$. На фотоприемнике формируется распределение интенсивностей, представляющее интерферограмму взаимодействия волновых фронтов E_1 и E_2 .

Интенсивность света — усредненное во времени количество энергии, пересекающее единицу площади, перпендикулярную к направлению потока энергии в единицу времени, на основании решения уравнений

Максвелла (для электрического поля в виде плоской волны) определяется как

$$I = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \langle E^2 \rangle = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \langle H^2 \rangle, \quad (1)$$

где для света, распространяющегося в одной и той же среде, $\langle E^2 \rangle$ можно считать мерой интенсивности.

Интерференционная картина на выходе интерферометра представляет результат суперпозиции двух монохроматических волн – эталонной E_1^0 и исследуемой E_1^n :

$$E_1^0 = E_1(x, y) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2}{2r_1} \right) \right\};$$

$$E_1^n = E_2(x, y) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2}{2r_2} \right) + \varphi_2(x, y) \right\},$$

где x, y – декартовы координаты выходного зрачка; λ – длина волны монохроматического источника света; r_1, r_2 – радиусы эталонной и исследуемой сфер взаимодействующих волновых фронтов; $\varphi_2(x, y)$ – функция аберрации исследуемого волнового фронта (отклонение от номинальной формы исследуемой поверхности).

В векторном пространстве интерференционная картина обусловлена равенством $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$, следовательно, $\mathbf{E}^2 = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$.

В скалярном пространстве уравнение интерференции имеет вид

$$I_{(x,y)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos 2\pi[\varphi_2(x, y)], \quad (2)$$

где $I_1 \sim |\mathbf{E}_1^2|$, $I_2 \sim |\mathbf{E}_2^2|$.

Таким образом, искомой функцией – отклонением формы – является $\varphi_2(x, y)$, которую можно найти из уравнения интерференции (2) при известной зарегистрированной при помощи фотоприемника интенсивности $I_{(x,y)}$. Интерференционная картина волновых фронтов, отраженных от обеих поверхностей (эталонной и контролируемой), регистрируется в виде интерферограммы. Далее определяются координаты центров интерференционных полос, являющихся энергетическими максимумами или минимумами интенсивности интерферограммы. В соответствии с принципом интерференции в координатах максимумов

интенсивности на интерферограмме разность хода волновых фронтов равна целому числу длин волн. В результате по оси, ортогональной плоскости интерферограммы, отсчитываются отклонения формы контролируемого волнового фронта от референтного в длинах волн. К этим отклонениям аддитивно добавлены параметры настройки интерферометра: наклон эталонного волнового фронта по отношению к контролируемому и его

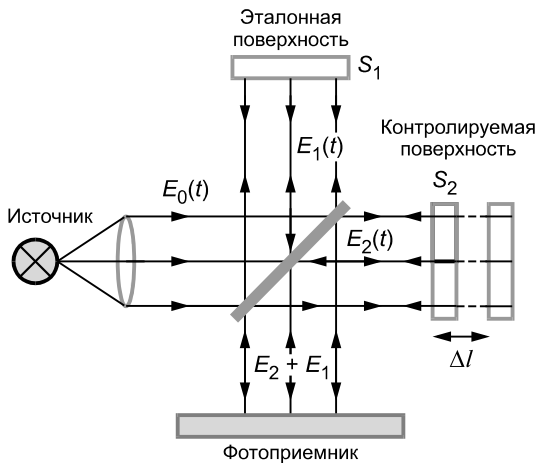


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра Тваймана–Грина

дефокусировка, представляющие неопределенности измерений, которые имеют систематический характер. Кроме того, к указанным отклонениям могут добавляться aberrации волновых фронтов оптической системы, также формирующие составляющие неопределенности измерений, имеющие систематический характер в случае, если ими нельзя пренебречь по сравнению с отклонением формы контролируемой поверхности. Поскольку и параметры настройки интерферометра, и указанные aberrации являются детерминированными функциями, представляемыми аналитически, то их влияние можно выявить, компенсировать или устранить математическими методами. Остаток после вычитания и будет отклонением формы контролируемого волнового фронта от референтного в заданной системе координат.

Описанный метод называется амплитудным интерференционным методом координатного измерения отклонения формы. Однако наряду с ним существует и амплитудно-фазовый метод, суть которого заключается в разделении периода синусоидального сигнала (например, на четыре сегмента) и подсчете количества фотонов, обнаруженных для каждого сегмента [4].

Существуют также другие методы измерений волнового фронта, представляющего интерференцию референтного и контролируемого

фронтов. При определенных условиях этими методами можно получать первичную измерительную информацию существенно точнее, чем амплитудным методом, однако «координатный аспект», заключающийся в измерениях на заданной системе координат точек величин, являющихся функциями координат контролируемой формы рельефа и его геометрических параметров, остается для всех указанных методов аналогичным. Поскольку интерференционный метод является лишь способом реализации измерений отклонения формы, то для него остается в силе указанная ранее специфика координатных измерений по сравнению с традиционными линейными измерениями: задания и поддержания в процессе измерений координатной (референтной) поверхности.

При измерении отклонений от плоскостности (и сферичности) используется интерферометр Физо, оптическая схема которого изображена на рис. 2. Следует отметить, что в большинстве известных работ [1, 4 – 6] реализуется дифференциальный (разностный) метод измерений, т. е. составляющая неопределенности измерений типа B оценивается как разность параметров интерферограмм эталонной и контролируемой поверхностей.

Таким образом, трудоемкость метрологических исследований интерферометров в значительной степени определяется изготовлением и

измерением эталонных поверхностей. Контроль формы и параметров рельефа поверхностей основан на анализе формы и расположения интерференционных полос, локализованных на контролируемой поверхности и спроецированных на матричный приемник. Анализ интерференционных картин и определение

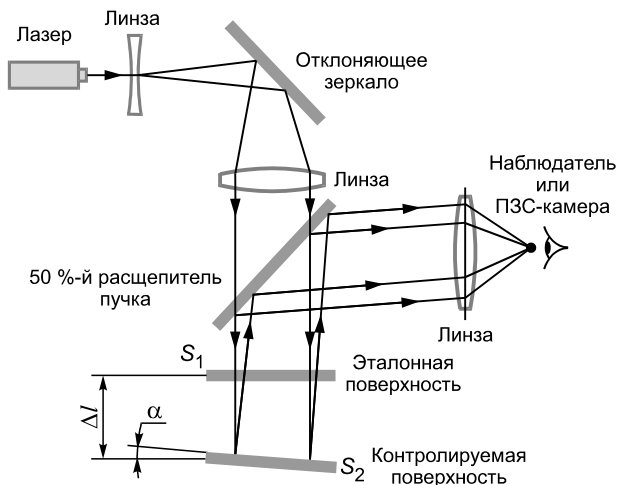


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра Физо

на его основе параметров рельефа и формы контролируемой поверхности или отраженного от нее волнового фронта выполняются при помощи компьютерной обработки по специальной программе.

Интерферометры типа Физо обеспечивают бесконтактные измерения отклонений от плоскостности полированных поверхностей размером до 300 мм. Отклонение от плоскостности исследуемой поверхности определяется формой полос в интерференционной картине, наблюдаемой на этой поверхности, и оценивается параметром, вычисляемым на основании результатов непосредственных измерений элементов интерференционной картины:

$$l = a\lambda / (2b),$$

где l – отклонение (в микрометрах) от плоскостности в выбранном сечении исследуемой поверхности, параллельном ребру клина, образованного этой поверхностью и эталонной плоскостью интерферометра; a , b – искривление и ширина интерференционной полосы; λ – длина волны источника света.

В практике интерференционных измерений принято измерять параметр $l = a/b$ в долях ширины интерференционной полосы.

Бюджет неопределенности измерений искривления интерференционной полосы складывается из неопределенностей измерительного устройства $\Delta a_{\text{и}}$; наведения на интерференционную полосу и отсчета $\Delta a_{\text{н}}$; связанной с дополнительными искривлениями интерференционных полос и смещением их в поле зрения, вызванными температурными изменениями $\Delta a_{\text{т}}$; обусловленной дополнительными искривлениями интерференционных полос, вызванными особенностями схемы интерферометра, неточностями юстировки и неопределенностями элементов прибора. Последний источник неопределенности, в свою очередь, зависит от неопределенностей: отклонения от плоскостности эталонной меры интерферометра Δa_0 и аттестации рабочей плоскости меры $\Delta a_{\text{оа}}$; дисторсии наблюдательной системы интерферометра $\Delta a_{\text{д}}$; aberrации коллиматорного объектива интерферометра $\Delta a_{\text{а}}$; расфокусировки коллиматорного объектива $\Delta a_{\text{ф}}$; неперпендикулярности рабочей поверхности меры оптической оси коллиматора $\Delta a_{\text{п}}$.

Бюджет неопределенности измерений ширины интерференционной полосы включает неопределенности измерительного устройства $\Delta b_{\text{и}}$, теплового смещения полос $\Delta b_{\text{т}}$ и наведения на полосу $\Delta b_{\text{н}}$.

Уменьшить неопределенность измерений можно при помощи использования естественных природных эталонных поверхностей

сравнения, типа вязкой и чистой жидкости: глицерина, минерального или касторового масла, ртути [4]. Известно, что горизонтальная поверхность жидкости является сферой с радиусом кривизны порядка 6400 км, при этом стрелка кривизны зеркальной поверхности жидкости определяется как

$$\Delta\chi = d^2/(8R),$$

где d – диаметр жидкой поверхности; R – радиус кривизны. При $d = 100; 200$ и 1000 мм имеем $\Delta\chi = 0,00019; 0,00078$ и $0,02$ мкм. При измерениях отклонений от плоскостности значениями $\Delta\chi$ порядка долей нанометра можно пренебречь.

Таким образом, если в интерферометре Физо в качестве эталонной поверхности применять ртуть, то неопределенность измерений будет обусловлена только неопределенностями, возникшими при интерпретации интерференционной картины, т. е. неопределенностями наведения на интерференционную полосу и отсчета.

В метрологии координатных измерений геометрических параметров обработанных поверхностей особое место занимают прецизионные измерения отклонений от плоскостности и сферичности оптических поверхностей. Для их контроля служат интерферометры различных типов (Физо, Тваймана–Грина, бокового и радиального сдвигов).

Среди различных методов подобных измерений интерферометрические методы занимают особое место как одни из самых точных. Под интерферограммой обычно понимают результат регистрации только фазы волнового поля и считают, что амплитуда поля не содержит полезной информации.

Рассмотрим идеализированную схему регистрации интерферограмм. Сигнал на выходе регистратора можно описать выражением

$$I = A^2 + B^2 + 2AB \cos \left[(2\pi/\lambda) (F_0 \varphi(x, y)) \right],$$

где A – опорный пучок с плоским фронтом; $B \exp[i\varphi(x, y)]$ – регистрируемое волновое поле; F_0 – пространственная частота, связанная с углом между опорным пучком и осью X соотношением $F_0 = \sin \omega$; ω – угол падения опорного пучка на интерферограмму.

Такое упрощенное описание справедливо лишь при отсутствии искажений и шумов. При описании реальных интерферограмм необходимо учитывать [4 – 6]:

наличие фона переменной яркости, связанного как с оптическими свойствами объекта (амплитудным пропусканием или коэффициентом

отражения поверхности), так и с изменениями интенсивности освещающего и опорного пучков;

мультипликативные помехи, вызванные теми же причинами, что и фон переменной яркости;

искажения за счет нелинейности характеристики регистрирующего элемента, выражающиеся в эффектах ограничения и уширения интерференционных полос;

аддитивные шумы, включающие шумы источника света, фотоматериалов и т.п.

В первом приближении все указанные факторы можно учесть в модели зарегистрированной интерферограммы

$$I = F \left\{ A^2(x, y) + B^2(x, y) + 2A^2(x, y)B^2(x, y) \cos \left[(2\pi/\lambda)(F_0x - \varphi(x, y)) \right] + N_1(x, y) \right\} + N_2(x, y).$$

Здесь $F\{\cdot\}$ – функция, описывающая нелинейность характеристики регистратора относительно интенсивности света; $N_1(x, y)$ – шум, регистрируемый вместе с сигналом (фоновый шум); $N_2(x, y)$ – шум регистратора.

При правильном подборе режима регистрации функция $F\{\cdot\}$ близка к линейной, а шум N_1 достаточно мал. Тогда можно записать

$$I = F \left\{ A^2(x, y) + B^2(x, y) + 2A^2(x, y)B^2(x, y) \cos \left[(2\pi/\lambda)(F_0x - \varphi(x, y)) \right] \right\} + N(x, y),$$

где $N(x, y)$ – суммарный шум.

В представлениях интерферограмм, записанных выше, вся информация об искомой функции $\varphi(x, y)$ содержится в выражении $\cos \left[(2\pi/\lambda)(F_0x - \varphi(x, y)) \right]$, которое будем называть математической интерферограммой.

Целью анализа интерферограммы является измерение значений функции $\varphi(x, y)$. При искажениях и шумах задача нахождения $\varphi(x, y)$ должна ставиться как статистическая задача получения оптимальной в смысле некоторого заданного критерия оценки $\varphi(x, y)$ по результатам измерений интенсивности I . Это нелинейная задача из класса так называемых обратных задач. В силу сложного нелинейного характера зависимости $\varphi(x, y)$ от наблюдаемой функции I и необходимости учитывать достаточно сложные статистические свойства шума решать ее в самой общей постановке без каких-либо упрощений трудно. Один из путей упрощения задачи состоит в том, чтобы разбить ее на две: оптимальную оценку математической интерферограммы по реальной и оптимальное восстановление функции

$\varphi(x, y)$ по полученной оценке. При малых искажениях и помехах отличие должно быть невелико.

Даже при отсутствии искажений и помех эта задача не является корректной в силу неоднозначности функции $\arcsin$. Если не задать никаких ограничений, то величину $(2\pi/\lambda)(F_0x - \varphi(x, y))$ можно определить только с точностью до знака и сдвига на $2k\pi$, где k – целое число.

Эту неоднозначность можно устранить, потребовав (и предусмотрев это при съемке интерферограммы), чтобы функция $(F_0x - \varphi(x, y))$ была монотонной вдоль направления x . Подобные интерферограммы будем называть одномерными. Они характерны для прецизионных оптических поверхностей. Поскольку эталонные меры плоскостности и сферичности являются прецизионными, их форма при интерференционном контроле, как правило, описывается одномерными интерферограммами.

Для того чтобы использовать единый подход при разработке системы обеспечения единства координатных интерференционных измерений отклонения от плоскостности и сферичности, необходимо:

- разработать общие принципы интерференционных координатных измерений отклонения от плоскостности и сферичности на интерферометрах с опорным волновым фронтом и интерферометрах сдвига;

- провести анализ и классификацию составляющих погрешностей координатных интерференционных измерений отклонений от плоскостности и сферичности;

- разработать методы и алгоритмы обработки интерферограмм, полученных на интерферометрах с опорным волновым фронтом и интерферометрах сдвига;

- на основе теоретического анализа процедуры координатных интерференционных измерений геометрических параметров отклонения от плоскостности и сферичности разработать [2, 3, 7]: структуру системы прослеживаемости интерференционных средств измерений к первичному эталону единицы длины; методики выполнения измерений и оценки неопределенностей, а также испытаний и поверки интерференционных СИ; методы и средства реализации системы прослеживаемости координатных интерференционных измерений параметров отклонения от плоскостности и сферичности.

Ответы на указанные вопросы позволят создать научные основы обеспечения единства координатных интерференционных измерений геометрических параметров плоских и сферических поверхностей.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.552.11.7056) с применением оборудования Центра коллективного пользования ВНИИОФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Метрологическое** обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: Учебное пособие / Под ред. В. Н. Крутикова. М.: Логос, 2011.
2. **ГОСТ Р 8.629–2007** ГСИ. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика поверки.
3. **Dotson C.** Fundamentals of dimensional metrology. N.Y.: Delmar Learning, 2006.
4. **Leach R. K.** Fundamental principles of engineering nanometrology. N.Y.: Elsevier Science & Technology, 2010.
5. **ГОСТ Р 8.743–2011.** ГСИ. Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 1. Термины, определения и основные соотношения.
6. **Левин Г. Г., Золотаревский С. Ю.** Количественная фазовая микроскопия на основе принципов интерференционной рефрактометрии // Метрология. 2008. № 3. С. 15–21.
7. **Кононов С. А., Голубев С. С., Лысенко В. Г.** Исследование измерительных и калибровочных возможностей средств измерений нанометрового диапазона // Законодательная и прикладная метрология. 2008. № 3. С. 19–26.

Дата принятия 11.06.2013 г.