

## Измерение параметров шероховатости с использованием интерференционного микроскопа

Н. Н. МОИСЕЕВ\*, И. Ю. ЦЕЛЬМИНА\*\*

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

\*\* Раменский приборостроительный завод, Раменское, Россия

*Рассмотрена методика измерения параметров шероховатости полированной поверхности в нанометровом диапазоне с помощью интерференционного микроскопа Линника с автоматической расшифровкой интерференционных программ по методу фазовых шагов.*

**Ключевые слова:** интерференционный микроскоп Линника, метод фазовых шагов, шероховатость, лазерное зеркало.

*The procedure of measurement of parameters of the polished surface roughness in nanometer range by means of Linnik interference microscope with automatic decoding of interference patterns by phase steps method is considered.*

**Key words:** Linnik interference microscope, phase steps method, roughness, laser mirror.

Измерение параметров шероховатости полированной поверхности в нанометровом диапазоне (наношероховатости) важно в оптическом производстве и, в частности, для отработки технологии изготовления оптических подложек зеркал и лазерных зеркал. Качество поверхности зеркал особенно важно при производстве современных лазерных гироскопов, где шероховатость указанной поверхности имеет субнанометровые значения.

В настоящее время существуют контактные и бесконтактные приборы для измерения шероховатости [1—3]. К контактным относятся различные профилометры, профилографы, а также атомно-силовые микроскопы. Бесконтактные методы измерений шероховатости реализуются с помощью оптических интерференционных микроскопов. Для измерения шероховатости в требуемом нанодиапазоне подходят только атомно-силовые и интерференционные микроскопы.

Ниже рассмотрена методика измерения параметров шероховатости подложек лазерных зеркал автоматизированным интерференционным микроскопом, в которой устанавливается порядок основных операций. Выполнение этих операций обеспечивает получение результатов измерений параметров шероховатости с использованием автоматизированного интерференционного микроскопа МИА-1М, внесенного в Государственный реестр средств измерений под № 48171-11. При помощи МИА-1М измеряют структуру микрорельефа (топограмму) поверхности, по которой вычисляют различные характеристики поверхности, в том числе параметры шероховатости  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_{max}$ , указанные в стандарте [4].

Рабочая поверхность подложек лазерных зеркал, как правило, представляет собой шаровой сегмент с радиусом кривизны 2 — 7 м. Поэтому перед вычислением параметров шероховатости измеренная топограмма поверхности аппроксимируется сферической поверхностью по методу минимизации среднего квадратического отклонения (СКО). По-

лученная поверхность служит базовой по [4] и относительно нее вычисляют параметры шероховатости. В соответствии со стандартом [5] для интерференционных микроскопов в качестве приписанной характеристики погрешности измерений параметров шероховатости  $R_z$ ,  $R_{max}$  принята граница предела допускаемой погрешности относительных измерений  $\Delta = 22\%$ , а диапазон измерений этих параметров составляет 0,05 — 10 мкм.

В качестве вспомогательного оборудования применяют прецизионную опорную пластину (Zуго, США), изготовленную из карбида кремния (в качестве эталона супергладкой плоскости), или другую пластину с аналогичными параметрами плоскостности и шероховатости; термометр; барометр.

Все измерения проводили на одном образце заготовки зеркала из литиево-алюмосиликатного материала СО-115М с показателем преломления 1,538 и плотностью 2,46 в одинаковых климатических условиях. Образец представляет собой плоскопараллельную пластину диаметром 22 мм, толщиной 4 мм и коэффициентом отражения не более 4%. На точность измерения параметров шероховатости полированной поверхности сильное влияние оказывает качество ее очистки от различных загрязнений. Поэтому непосредственно перед измерениями исследуемую поверхность подвергали безкислотной химической очистке.

Для достижения субнанометровой точности измерений высоты рельефа полированной поверхности необходимо, во-первых, чтобы зеркало опорного канала интерференционного микроскопа было максимально гладким и плоским. Во-вторых, следует создать так называемый базовый файл системной ошибки и учитывать его при проведении измерений. И, в-третьих, требуется многократно повторять измерения для минимизации случайных погрешностей. Базовый файл содержит результаты цифровой записи волнового фронта, отраженного от эталонной поверхности, установленной в предметном канале интерферометра; его иногда называют базовой плоскостью. Данный файл несет информацию о си-

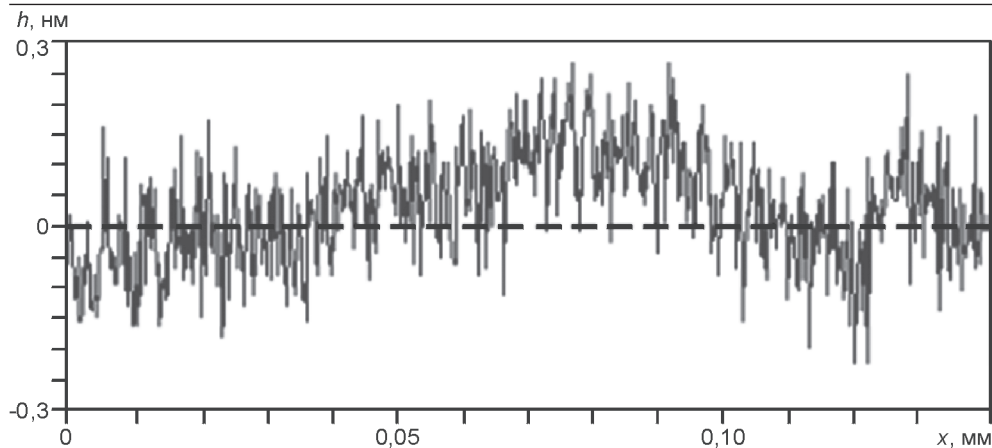


Рис. 1. Сечение топограммы поверхности эталона из карбида кремния, полученной с помощью микроскопа NewView 6200; PV = 0,496 нм; RMS = 0,092 нм; 1 пикс. = 0,219 мкм

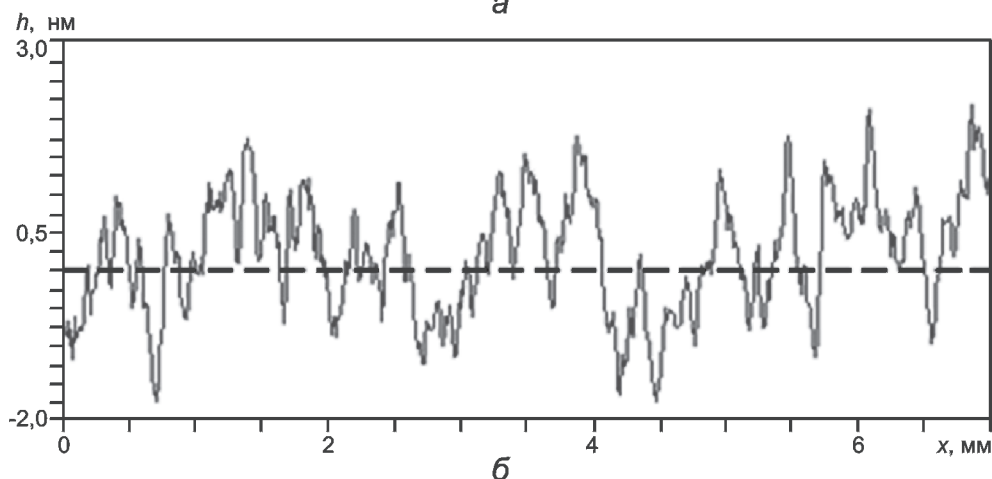
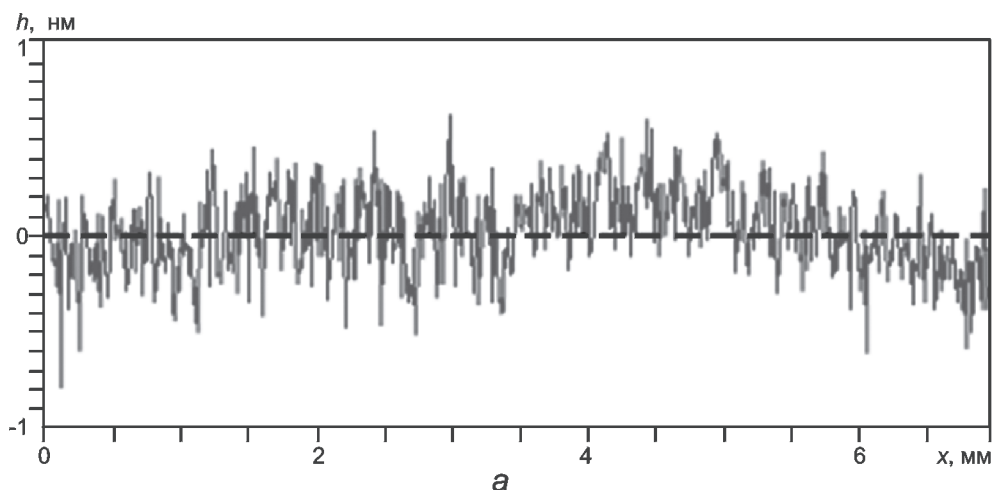


Рис. 2. Сечение топограмм поверхностей опорных зеркал: а — изготовленного (PV = 1,426 нм; RMS = 0,217 нм) и б — «штатного» (PV = 4,044 нм; RMS = 0,8 нм); 1 пикс. = 11 мкм

стематической погрешности измерений, вызванной аберрациями оптической системы микроскопа и несовершенством поверхности опорного зеркала интерферометра.

Для записи базовой плоскости в качестве объекта измерения используют эталонное супергладкое зеркало из карбида кремния. Его рабочая поверхность изготовлена с мак-

симально возможной точностью и имеет следующие характеристики: максимальное отклонение топографии рабочей поверхности от идеальной плоскости PV = 10 нм; SKO топографии рабочей поверхности от идеальной плоскости RMS не более 2 Å; максимальный перепад высоты PV на рабочем участке поверхности размером около 150 мкм не более 5 Å; шероховатость по параметру SKO (или RMS) на этом же участке не более 1 Å. Сечение топограммы участка размером 140×105 мкм, усредненной по 30 различным участкам карбидкремниевое эталонного зеркала, полученное при помощи сканирующего интерференционного микроскопа белого света NewView 6200 (Zygo, США), показано на рис. 1.

Во время проведения рабочих измерений и обработки их результатов выполняется вычитание значений базового файла из топографии измеряемого объекта. Полученные данные максимально точно описывают топографию исследуемого объекта и не содержат систематическую погрешность микроскопа. Эту процедуру можно назвать методом «двух экспозиций» по аналогии с голографической интерферометрией. Во время первой экспозиции записывается топограмма базовой плоскости, а во время второй — измеряемой поверхности. Результатом измерений служит разность этих двух топограмм, вычисляемая программно на компьютере.

Для опорного канала автоматизированного интерференционного микроскопа МИА-1, созданного во ВНИИОФИ (Россия), было изготовлено специальное зеркало диаметром 8 мм, параметры которого измерены также с использованием микроскопа NewView 6200. Отклонение от плоскостности составило не более 1,5 нм, а шероховатость (SKO, или RMS) по всей измеряемой площади — около 0,2 нм. Сечение топограммы поверхности такого («супергладкого») зеркала опорного канала приведено на рис. 2, а. Для сравнения на рис. 2, б показана топограмма

«штатного» опорного зеркала МИИ-4, шероховатость которого составляет около 0,8 нм, т. е. в 4 раза больше.

Все указанные результаты получены при многократном повторении измерений. Так, базовый файл обычно снимается при 30-кратном усреднении. Чем больше повторений, тем меньше влияние погрешностей, имеющих случайную при-

роду. В автоматизированном интерференционном микроскопе такого рода погрешности связаны, в основном, с каналом регистрации оптического излучения, пьезоэлектрическим блоком сканирования и вибрациями. При осуществлении защиты от вибраций отмеченные случайные погрешности формируют собственный шум. Оценить собственный шум достаточно просто. Для этого необходимо создать базовый файл системной ошибки с применением эталона супергладкой плоскости из карбида кремния при фиксированном положении эталона относительно поля зрения микроскопа. Затем, не изменив положения эталона, провести вторую серию измерений и вычесть из полученной топограммы базовый файл. Итоговый результат будет зависеть от уровня собственного шума.

В соответствии с описанной процедурой была проведена оценка собственных шумов автоматизированного интерференционного микроскопа МИА-1М. Полученный результат показан на рис. 3; СКО от идеальной плоскости по всей площади поверхности составляет не более 0,2 нм. Такой уровень собственного шума позволяет использовать МИА-1М для контроля параметров супергладких поверхностей, например, подложек и лазерных зеркал.

Для сравнения были выполнены измерения шероховатости рабочей поверхности подложки лазерного зеркала при помощи двух интерференционных микроскопов: МИА-1М и NewView 6200. Оказалось, что шероховатость поверхности, зарегистрированная МИА-1М, больше полученной на NewView 6200. При этом значения  $R_{\max}$  (или PV) отличаются приблизительно на 1 нм (2,5 и 1,4 нм, соответственно), а СКО (или RMS) — приблизительно на  $0,7 \text{ \AA}$  (2,8 и  $2,2 \text{ \AA}$ , соответственно). Это следует из рис. 4, где приведены сечения топограмм рабочей поверхности подложки лазерного зеркала, зарегистрированных микроскопами МИА-1М и NewView 6200. Причина такого расхождения возможно кроется в разных принципах работы интерференционных микроскопов разных типов. Для МИА-1М, работающего по методу фазовых шагов, требуется точная фокусировка предметного канала, что не всегда удается оператору. Для сканирующего интерференционного микроскопа белого света (типа NewView 6200) точная фокусировка предметного канала не требуется, и связанный с этим процессом источник погрешностей отсутствует.

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

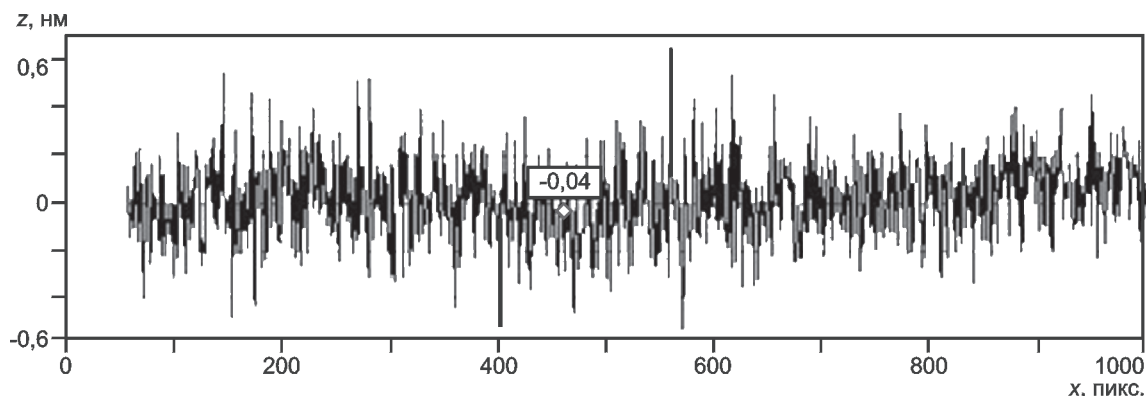


Рис. 3. Сечение топограммы поверхности эталона супергладкой плоскости из карбида кремния, полученной с помощью МИА-1М; PV = 3,355 нм; RMS = 0,195 нм; 1 пикс. = 0,12 мкм

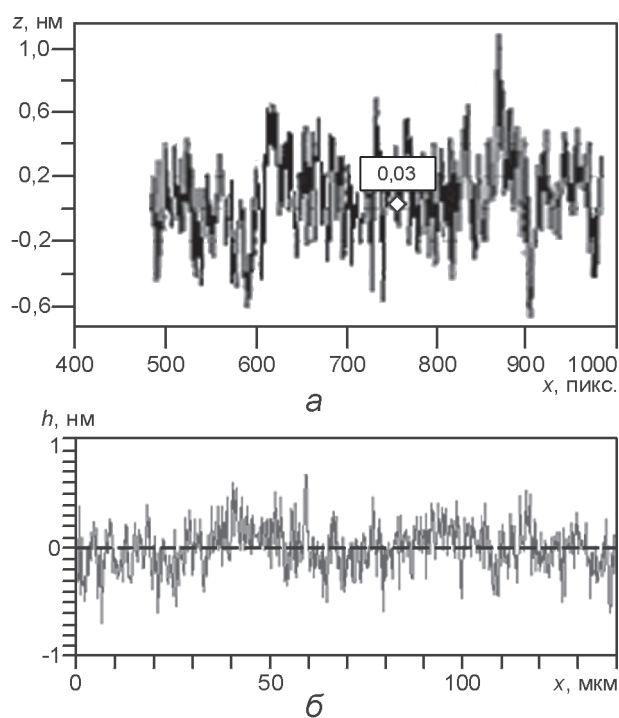


Рис. 4. Сечения топограммы поверхности подложки лазерного зеркала, полученные на микроскопах: а — МИА-1М (PV = 2,498 нм; RMS = 0,282 нм; 1 пикс. = 0,12 мкм); б — NewView 6200 (PV = 1,4 нм; RMS = 0,219 нм; 1 пикс. = 0,219 мкм)

#### Л и т е р а т у р а

1. **Карташев А. И.** Шероховатость поверхности и методы ее измерения. М.: Изд-во гос. комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1964.
2. **Егоров В. А.** Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности. М.: Машиностроение, 1965.
3. **Уайтхауз Д.** Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2009.
4. **ГОСТ 2789—73.** Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
5. **ГОСТ 9847—79.** Приборы оптические для измерения параметров шероховатости поверхности. Типы и основные параметры.

Дата принятия 02.05.2012 г.