

# Интерференционный микроскоп фазового сдвига для контроля параметров шероховатости поверхностей оптических деталей

*И. Ю. Фандиенко<sup>1,2</sup>, Г. Н. Вишняков<sup>2</sup>, В. Л. Минаев<sup>2</sup>, Р. В. Минаев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ООО «Электростекло», Москва, Россия

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

Разработан и экспериментально подтверждён метод динамической интерферометрии фазового сдвига для контроля локальных отклонений микро- и нанометрового уровня поверхностей оптических деталей от заданного профиля. Разработан и создан микроскоп интерференционный «НаноСкан» со специальным программно-аппаратным комплексом для управления измерениями и анализом результатов. Экспериментально подтверждены метрологические и технические характеристики разработанного прибора. Представлены результаты измерений среднего квадратического отклонения локальных дефектов поверхностей тисненных голограмм, а также крупногабаритных оптических деталей. Обеспечивается прослеживаемость измерений в соответствии с государственной поверочной схемой, утвержденной приказом Росстандарта от 06.11.2019 № 2657, к ГЭТ 113-2014. Микроскоп интерференционный «НаноСкан» включен в Федеральный информационный фонд под № 87394-22.

*Ключевые слова:* Оптический контроль, Крупногабаритная оптика, Интерферометрия, Профилометрия, Голография, Измерения шероховатости поверхности, Метод фазовых шагов, Микроскоп интерференционный.

*Цитирование:* Фандиенко, И. Ю. Интерференционный микроскоп фазового сдвига для контроля параметров шероховатости поверхностей оптических деталей / И. Ю. Фандиенко, Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев, Р. В. Минаев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 240–246.

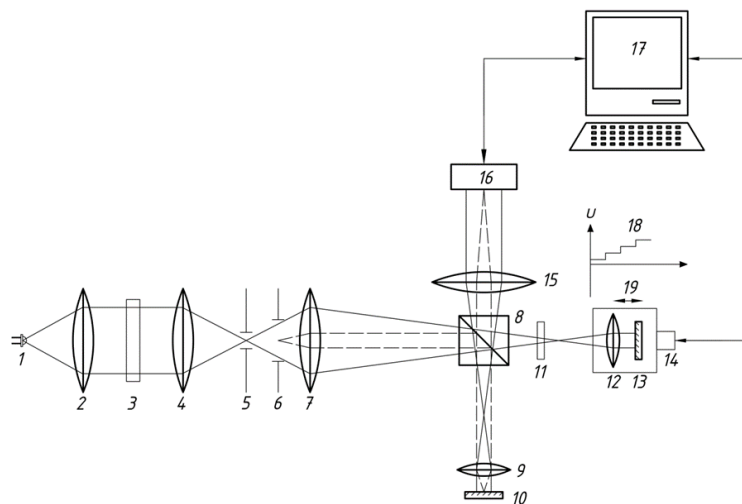
## Введение

В современной метрологии оптических изделий и систем наряду со сканирующими зондовыми микроскопами, работающими в контактном и бесконтактном режимах, получают распространение бесконтактные методы профилометрии, базирующиеся на принципах лазерной интерферометрии высокого пространственного разрешения. Оптическая микроинтерферометрия, основанная на реконструкции фазы методом фазовых шагов, является одним из наиболее эффективных методов оценки параметров структуры поверхностей оптических изделий. С целью обеспечения высокой точности, скорости и воспроизводимости получаемых в процессе контроля результатов состояния поверхностного слоя деталей в ООО «Электростекло» был разработан интерференционный микроскоп фазового сдвига «НаноСкан-01».

## 1. Принцип действия

Принцип действия прибора основан на интерференции световых пучков излучения, отраженных от опорного зеркала и измеряемой поверхности. Микроскоп интерференционный реализован по схеме В.П. Линника. Получение информации о микрорельефе осуществляется с помощью метода фазового сдвига при помощи управляемого от персонального компьютера зеркала на пьезоэлементе, встроенного в опорное плечо микроскопа. Для этого интерференционные картины при различных положениях опорного зеркала регистрируются с помощью встроенного многоэлементного фотоприемного устройства и передаются в персональный компьютер. Для осуществления управления сдвигом пьезоэлемента и расшифровки интерферограмм разработано специальное программно-математическое обеспечение (СПМО) «MicroScan» для операционной среды WINDOWS. В результате математической обработки результатов измерений восстанавливается оптическая разность хода, соответствующая измеряемому профилю поверхности, по которой рассчитываются параметры шероховатости. Результаты измерений в виде таблиц с параметрами и двумерного распределения высоты и графиков

Оптическая схема микроскопа интерференционного представлена на рисунке 1.



1 — источник излучения; 2, 4 — ахроматические линзы; 3 — светофильтр; 5 — апертурная диафрагма; 6 — полевая диафрагма; 7 — конденсор; 8 — светоделитель; 9, 12 — микрообъективы; 10 — исследуемый объект; 11 — затвор; 13 — опорное зеркало; 14 — микрометрический винт; 15 — проекционная линза; 16 — многоэлементное ФПУ; 17 — персональный компьютер; 18 — вид сигнала, подаваемого на пьезопривод; 19 — узел, объединяющий микрообъектив и опорное зеркало

**Рис. 1.** Оптическая схема микроскопа интерференционного «НаноСкан-01»

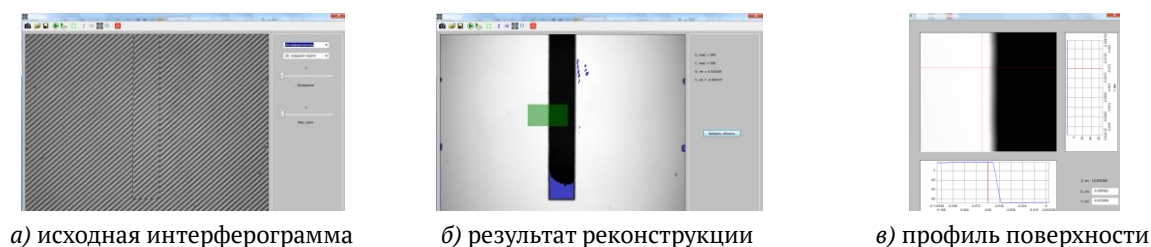
Микроскоп работает по следующему принципу. Изображение источника излучения 1 строится с помощью оптической системы, состоящей из двух ахроматических линз 2 и 4, в плоскости апертурной диафрагмы 5. Между линзами, в области хода параллельного пучка, расположен интерференционный светофильтр 3. С помощью конденсора 7 изображение апертурной диафрагмы переотражается в передние фокальные плоскости идентичных

микрообъективов 9 и 12 после предварительного разделения на предметный и опорный пучки с помощью светоделителя 8. Предметный пучок (вертикальный) падает на исследуемый объект 10 и, отразившись от него, проходит через тот же микрообъектив и светоделитель. Опорный пучок (горизонтальный) падает на опорное зеркало 13. Отраженный от опорного зеркала пучок также проходит через микрообъектив и светоделитель. Оба пучка (предметный и опорный), пройдя через проекционную линзу 15, строят изображение предмета и опорного зеркала в плоскости фотодетектора – матрицы видеокамеры 16. Видеокамера управляется от персонального компьютера 17. В передней фокальной плоскости конденсора 7 расположена полевая диафрагма 6, оптически сопряженная с плоскостью опорного зеркала, объекта и с матрицей камеры. В опорном канале расположен затвор 11, который позволяет перекрывать этот канал, выключать интерференционный режим работы и переводить микроскоп в режим оптического микроскопа на отражение. Проекционный объектив 9 строит изображение измеряемого предмета, опорного зеркала и полевой диафрагмы на матрице камеры. Опорное зеркало 13 вместе с микрообъективом 12 составляет единый узел, который может перемещаться с помощью микрометрической подвижки, для настройки разности хода между каналами и регулировки контраста полос. Само зеркало наклеено на пьезоэлемент, который обеспечивает его точное перемещение для реализации метода фазовых шагов. Пьезопривод управляется через блок управления от персонального компьютера [1-6].

## 2. Программное обеспечение

В СПМО «MicroScan» комплекса предусмотрена возможность реконструкции поверхности объекта с вычитанием базовой поверхности и без ее вычитания.

Вычитание базы позволяет устранить aberrации оптической системы за счет предварительной регистрации волнового фронта без объекта. В случае реконструкции без вычитания базы устранение aberrации происходит за счет вычитания из реконструируемого волнового фазового фронта синтезированной полиномами двумерного распределения фазы. В этом случае, в зависимости от настроек, сделанных при монтаже системы, используются либо полиномы Цернике, либо двумерный полином 2-го порядка. На рисунке 2 представлены виды окна программы «MicroScan» с исходной интерферограммой (рис.2.а), результатом реконструкции 3D профиля поверхности (рис.2.б) и увеличенным участком поверхности, выделенным зеленым цветом, с 1D профилями поверхности (рис.2.в).



**Рис. 2.** Виды окна программы «MicroScan» для детального просмотра восстановленной поверхности исследуемого объекта

В качестве объекта исследования использовалась мера шероховатости SHS-1800 QS, зав. №8897-33-16, с номинальным значением параметра шероховатости  $R_{max}=0,180$  мкм из набора «Эталона единицы длины в области измерения параметров шероховатости  $R_{max}$  в диапазоне от 0,02 до 1,8 мкм и  $R_a$  номинального значения 0,0015 мкм». Мера представляет собой ступеньку (полоску) высотой около 180 нм. В центральной части рисунка 2 синим цветом выделены области, где по условиям низкой освещенности расчет оказался невозможным. Дальнейшие вычисления по этим областям не производятся.

### 3. Контроль крупногабаритных деталей

С целью осуществления прецизионного позиционирования и перемещений разработанного прибора по задаваемой координатной сетке крупногабаритных оптических деталей был разработан и изготовлен прецизионный координатный портал с ЧПУ. Помимо требований по обеспечению точности и повторяемости позиционирования к данному устройству предъявлялись высокие требования по исключению влияния вибрационных резонансов на измерительный комплекс в процессе его юстировки и эксплуатации.

В качестве основной, была выбрана конструкция портала с подвижным столом, что положительно сказывается на режимах работы комплекса. На рисунке 3 представлен внешний вид измерительного комплекса.



а) конструкция с расширенным порталом



б) стандартная конструкция

**Рис. 3.** Внешний вид измерительного комплекса на основе микроскопа интерференционного «НаноСкан-01», установленного на прецизионном координатном портале с ЧПУ для исследования параметров поверхностей крупногабаритных оптических деталей

В конструкции применены чугунные несущие элементы. Чугунная конструкция по сравнению со стальной имеет более высокую жесткость и способность к поглощению вибрации. Большая плоскость поперечного сечения элементов дает минимальные отклонения микроскопа интерференционного при проведении исследований и позволяет достичь высокой точности позиционирования.

Для эффективного противодействия вибрациям ЧПУ портал с установленным микроскопом интерференционным «НаноСкан» размещен на гранитной плите и развязан по вибрационным нагрузкам с применением специализированных виброопор.

#### 4. Результаты испытаний

Испытания в целях утверждения типа микроскопов интерференционных «НаноСкан-01» были проведены Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГБУ «ВНИИОФИ»). В результате испытаний микроскоп интерференционный «НаноСкан-01» как средство измерений внесен в Федеральный информационный фонд под рег. №87394-22.

Метрологические и технические характеристики микроскопа «НаноСкан-01», взятые из его Описания типа, приведены в таблицах 1, 2.

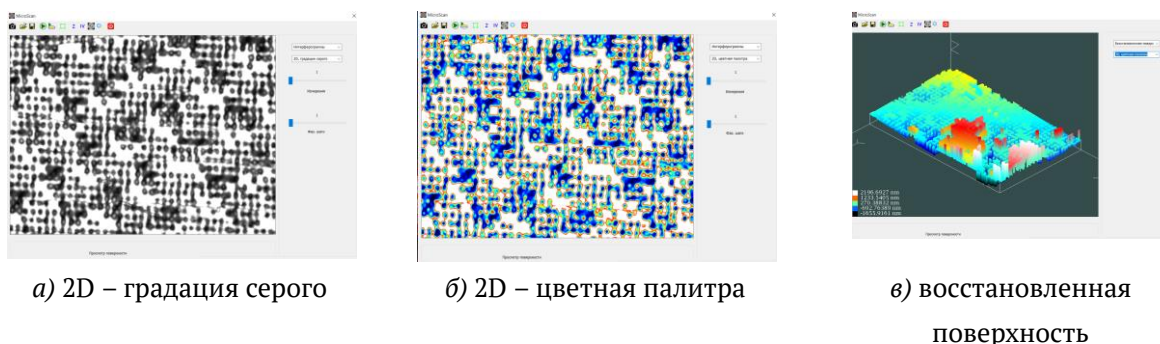
**Таблица 1.** Метрологические характеристики микроскопа

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерений параметров шероховатости Ra, мкм*	от 0,02 до 0,07
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений параметра шероховатости Ra, мкм, не более	0,0008
Диапазон измерений параметров шероховатости Rmax, мкм*	от 0,02 до 0,2
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений параметра шероховатости Rmax, мкм, не более	0,003
* Базовая длина для параметров Ra, Rmax определяется по ГОСТ 2789-73.	

**Таблица 2.** Технические характеристики микроскопа

Наименование параметра	Значение
Поле зрения, мм, не более	1×1
Длина волны излучения, нм	532
Диапазон показаний параметров шероховатости Rmax, Rz, Ra, Rq по ГОСТ 25142-82, мкм	от 0,0001 до 0,2
Диапазон показаний параметров шероховатости Sz, Sa, Sq по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, мкм	от 0,0001 до 0,2
Алгоритм расшифровки интерферограмм	метод фазовых шагов
Размерность изображения, пиксель, не менее	1920×1200
Число вводимых градаций яркости, бит, не менее	12
Время измерения и обработки, сек, не более	30
Число шагов для реконструкции интерферограмм методом фазовых шагов, не менее	5
Электропитание от сети переменного тока: - напряжением, В - частотой, Гц	от 200 до 250 от 50 до 60
Габаритные размеры (длина×ширина×глубина), мм, не более	500×250×200
Масса, кг, не более	5
Условия эксплуатации: - температура окружающей среды, °С - относительная влажность воздуха, %	от +15 до + 25 от 50 до 80

Микроскоп «НаноСкан-01» был также опробован для целей исследования структуры поверхности тисненных радужных голограмм. Результаты на рисунке 4.



**Рис. 4.** Восстановленные топограммы поверхности тисненной радужной голограммы (полутоновое, псевдоцветное и аксонометрическое изображение)

### Заключение

В ходе работы был разработан и экспериментально подтверждён метод динамической интерферометрии фазового сдвига для контроля локальных отклонений микро- и нанометрового уровня поверхностей оптических деталей от заданного профиля. Также были созданы микроскоп интерференционный «НаноСкан» и специальный программно-аппаратный комплекс для управления измерениями и анализом результатов. Экспериментально подтверждены метрологические и технические характеристики разработанного прибора. Представлены результаты измерений среднего квадратического отклонения локальных дефектов поверхностей тисненных голограмм, а также крупногабаритных оптических деталей.

### Список источников

- [1] Назаров Ю. Ф., Шкилько А. М., Тихоненко В. В., Компанец И. В. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5. – №. 3-4. – С. 207-216.
- [2] Мальков, О. В. Измерение параметров шероховатости поверхности детали / О. В. Мальков, А. В. Литвиненко. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", 2012. – 22 с. – EDN ZEFI GL.
- [3] Айрапетян В. С., Губин С. Г., Макеев А. В. Оптические исследования шероховатости // Труды XV Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». Новосибирск.: НГТУ. – 2014. – С.8 – 10.
- [4] Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Орлов В. М. Измерение параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии // Метрология. – 2009. – № 9. – С. 15-24.
- [5] Линник В. П. Простой интерферометр для исследования оптических систем // Труды ГОИ. Том X. – 1933. – №. 95.
- [6] Вишняков Г. Н. и др. Методы автоматизации обработки интерферограмм фазовых объектов // Метрология. – 2008. – №. 4. – С. 15-25.

# Phase shift interference microscope for monitoring the surface roughness parameters of optical parts

*I. Y. Fandienko<sup>1,2</sup>, G. N. Vishnyakov<sup>2</sup>, V. L. Minaev<sup>2</sup>, R. V. Minaev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Crystaltechno, Moscow, Russia

<sup>2</sup> FSUE «All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements», Moscow, Russia

A method of dynamic phase shift interferometry has been developed and experimentally confirmed to control local deviations of the micro- and nanometer levels of the surfaces of optical parts from a given profile. An interference microscope "NanoScan" with a special software and hardware system for controlling measurements and analyzing results was developed and created. The metrological and technical characteristics of the developed device are experimentally confirmed. The results of measurements of the mean square deviation of local defects in the surfaces of embossed holograms, as well as large-sized optical parts, are presented. The traceability of measurements is ensured in accordance with the state verification scheme approved by the order of Rosstandart dated November 6, 2019 No. 2657, to GET 113-2014. The interference microscope "NanoScan" is included in the Federal Information Fund under No. 87394-22.

*Keywords:* Optical control, Large-sized optics, Interferometry, Profilometry, Holography, Surface roughness measurements, Phase step method, Interference microscope.