

На правах рукописи

СЫСОЕВ Евгений Владимирович

ИЗМЕРЕНИЕ МИКРО- И НАНОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ
МЕТОДАМИ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

01.04.05 «Оптика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке, исследованию и применению новых бесконтактных измерительных методов низкокогерентной интерферометрии для решения задач профилометрии в диапазоне от десятых долей нанометра до десятков миллиметров. Результаты исследований автора и их практическое применение являются актуальными и были востребованы как на этапе разработки и дальнейшего совершенствования системы "Профиль", предназначенной для измерения профиля и глубины дефектов оболочки ТВЭЛ, так и при разработке универсального интерференционного микроскопа-профилометра МНП-1 для измерения микро- и нанорельефа поверхностей. Использование предложенных методов низкокогерентной интерферометрии, новейшей оптико-электронной базы и возможностей, предоставляемых современными средствами вычислительной техники, позволило создать быстродействующую систему для измерения нанорельефа поверхности, превосходящую по производительности и разрешающей способности измерения лучшие (в своем классе) зарубежные измерительные системы.

Актуальность работы.

Измерение рельефа поверхности оптическими бесконтактными методами в автоматическом режиме с высокой точностью является важной задачей при контроле продукции промышленного производства. Интерференционные методы позволяют измерять рельеф технических поверхностей с разрешением более 0,2 мкм, погрешностью менее 1 мкм и высокой производительностью (более 10^5 измеряемых точек в секунду). Широкое использование нанотехнологий и наноматериалов в мировом и отечественном промышленном производстве, постоянно растущие требования по контролю качества промышленных изделий машиностроения, электроники и точной механики делают оптическую низкокогерентную интерферометрию одним из наиболее перспективных направлений современного приборостроения.

Существующие интерференционные методы и средства измерений рельефа применяются для решения широкого круга задач профилометрии в метрологии, промышленности и научных исследованиях. В настоящее время многие зарубежные фирмы (Zeiss - Германия, Zygo, Veeco - США и др.) предлагают широкий спектр микроскопов-профилометров на основе низкокогерентной интерферометрии. Но они в основном предназначены для работы в лабораторных условиях. В России также ведутся исследования по интерференционным измерениям рельефа поверхности. Как правило, они ориентированы на применение уже известных методов для решения конкретных задач.

В связи с развитием оптико-электронной базы, компьютеров и программного обеспечения аппаратура и методы низкокогерентной интерферометрии постоянно совершенствуются. Однако, как показывает анализ публикаций, еще недостаточное развитие получили способы обнаружения интерференционных сигналов и быстродействующие методы измерения и контроля поверхности промышленных изделий. Оптико-электронные системы интерференционных профилометров с продольным фазовым сдвигом, базирующиеся на предположении о косинусоидальном характере интерференции и расчете абсолютного значения фазы, имеют низкую производительность, разрешающую способность по высоте и большую

погрешность измерений. Необходимость обеспечения в большом диапазоне прецизионного механического сканирования в интерферометрах продольного сдвига приводит к заметному усложнению их конструкции. Высокая цена профилометров ограничивает их доступность для исследователей.

Это требует дальнейшего развития оптических схем интерферометров, обеспечивающих автоматическую работу интерференционных измерительных систем в производственных условиях, создания новых алгоритмов устойчивого обнаружения интерференции, поиска новых способов, позволяющих измерять рельеф поверхностей с высокой производительностью, меньшей погрешностью и большей разрешающей способностью. Поэтому совершенствование методов и аппаратуры измерения рельефа поверхностей, разработка перспективных схемотехнических решений с применением современной элементной оптико-электронной базы является актуальной задачей.

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию предложенных автором методов измерения рельефа поверхности на основе низкокогерентной интерферометрии.

Целью работы является разработка и исследование оптических методов низкокогерентной интерферометрии, программно-аппаратных средств для 3D автоматических измерений микро- и нанорельефа поверхностей с высоким быстродействием и разрешением, применение их для решения контрольно-измерительных задач в промышленности и в научных исследованиях.

Задачи исследований:

1. Разработка на основе низкокогерентной интерферометрии бесконтактных 3D методов измерения микро- и нанорельефа поверхностей, обеспечивающих высокую точность и быстродействие, а также большой динамический диапазон измерений по высоте.

2. Разработка программно-аппаратных средств исследования методов и средств низкокогерентной интерферометрии для измерения микро- и нанорельефа поверхности.

3. Разработка алгоритмов обработки интерферограмм для высокоточных измерений микро- и нанорельефа поверхности.

4. Анализ и оценка основных источников погрешностей при измерении микро- и нанорельефа поверхностей с использованием интерференции частично когерентного света и поиск путей их снижения.

5. Экспериментальные исследования методов и аппаратуры для измерения микро- и нанорельефа поверхностей разного класса чистоты.

6. Разработка быстродействующей оптико-электронной системы для автоматического измерения глубины и профиля микродефектов поверхности.

Методы исследований. Результаты исследований, представленные в диссертации, получены путем теоретического анализа, численного моделирования и физических экспериментов с использованием созданных образцов техники.

Научная новизна. Новыми результатами диссертации являются:

1. Быстродействующий метод измерения рельефа поверхностей промышленных изделий с разрешением по высоте менее 0,2 мкм в диапазоне не менее 10 мм на основе дифференциальных интерферограмм в частично когерентном

свете, получаемых в процессе продольного сдвига интерферометра (защищен патентом).

2. Способ автоматического расчета адаптивного порога обработки интерферограмм для поверхностей с неравномерным рассеянием света по площади, который увеличивает диапазон обнаружения интерференции более чем в 10 раз и повышает вероятность ее определения до 96%.

3. Оптическая схема трехзеркального интерферометра, позволяющая получить полизональную интерференцию в частично когерентном свете, и её аналитическое описание. Метод допускового контроля на основе полизональной интерференции, дающий возможность обнаруживать предельные отклонения рельефа без сканирования по высоте, что на порядок повышает производительность измерений.

4. Высокоразрешающий бесконтактный интерференционный метод измерения нанорельефа поверхности на основе частичного сканирования коррелограмм в диапазоне менее 1 мкм, позволяющий получить разрешение по высоте менее 0,1 нм.

Практическая значимость работы и результаты внедрения.

1. Для решения задачи атомной отрасли по бесконтактному автоматическому 3D контролю дефектов оболочки ТВЭЛ впервые в России создан промышленный образец высокопроизводительной оптико-электронной системы "Профиль". Система сертифицирована и внесена в Государственный Реестр как тип средств измерений. Она внесена в перечень важнейших достижений СО РАН за 2002 г. Три образца системы с 2002 г. находятся в промышленной эксплуатации в производственных линиях предприятий Росатома.

2. Впервые в России создан универсальный автоматизированный интерференционный цифровой микроскоп-профилометр, обеспечивающий измерение рельефа поверхностей с микро- и наноразрешением, который может использоваться в научных исследованиях, промышленности, а также для решения различных метрологических задач. Разработка внесена в перечень важнейших достижений РАН за 2007 г. и СО РАН за 2007 г., 2009 г.

3. Разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать измеряемые поверхности, параметры оптической схемы интерферометра, процессы регистрации и обработки интерферограмм, а также производить 3D реконструкцию микро- и нанорельефа поверхности. Созданное программное обеспечение может использоваться при разработке новых оптико-электронных измерительных систем, а также в учебном процессе.

4. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых быстродействующих и высокоразрешающих измерительных систем на основе низкокогерентной интерферометрии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод измерения рельефа поверхностей на основе дифференциальных интерферограмм в частично когерентном свете позволяет получить разрешение по высоте менее 0,2 мкм в диапазоне не менее 10 мм (защищен патентом).

2. Способ обнаружения интерференции на основе адаптивного порога, рассчитываемого по интенсивности интерференционного фона, расширяет диапа-

зон обнаружения интерференции более чем в 10 раз и повышает вероятность ее определения до 96%.

3. Трехзеркальный интерферометр частично когерентного света дает возможность измерять высоту рельефа технических поверхностей путем создания множества непересекающихся зон интерференции, разнесенных на заданное расстояние по высоте.

4. Метод допускового контроля технических поверхностей на основе полизональной интерференции позволяет на порядок повысить производительность измерений.

5. Метод бесконтактного измерения нанорельефа поверхностей на основе частичного сканирования коррелограмм в диапазоне менее 1 мкм обеспечивает разрешение по высоте менее 0,1 нм.

Личный вклад автора. Непосредственное участие в постановке задач исследований по теме диссертации. Автором предложены методы измерения микро- и нанорельефа поверхностей, оптическая схема трехзеркального интерферометра для получения полизональной интерференции в частично когерентном свете и её аналитическое описание, методика расчета адаптивного порога, быстродействующий метод допускового контроля дефектов поверхности, моделирующие программы и алгоритмы обработки интерферограмм. Экспериментальные исследования, работы по созданию, испытанию и внедрению оптико-электронных систем измерения рельефа поверхностей, рабочего программного обеспечения выполнены коллективом исследователей и инженеров под руководством и при непосредственном участии автора.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и отечественных конференциях и семинарах: XVI IMEKO World Congress "Education and Training in measurement and Instrumentation", Vienna, Austria, Sept. 25-28, 2000; ISA 2001 Technical Conference "IMEKO Special Millennium Sessions", USA, Houston, Texas, September 10-13, 2001; Seventh International Symposium "Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life", Novosibirsk, Russia, September 9-13, 2002; LIII Международная научно-техническая конференция, "Современные проблемы геодезии и оптики", Новосибирск, 2003; Совещание главных метрологов Минатома России, Сочи, 6-11, октября 2003 г.; Научный конгресс Гео-Сибирь-2005 "Специализированное приборостроение, метрология", Новосибирск, 25-29 апреля, 2005; Международный конгресс Гео-Сибирь-2007, Новосибирск, 2007; Научно-техническая конференция ОАО "ТВЭЛ" (НТК-2008) "Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направление развития", Москва, 19-21 ноября, 2008; The 9th International Symposium ISMTPI-2009, Saint-Petersburg, Russia, June 29 - July 2, 2009.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, в том числе одним патенте РФ, 8 научных статьях (6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 – в иностранных журналах), в трудах 8 международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем - 135

страниц. Иллюстративный материал включает 62 рисунка и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 156 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость темы диссертационного исследования, формулируются его цель и задачи, раскрывается структура работы и излагаются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ современного состояния и тенденций развития оптической профилометрии на основе интерференции частично когерентного света. Рассмотрены основные типы интерферометров с делением амплитуды волнового фронта, существующие оптические методы измерения рельефа поверхности, показаны преимущества интерферометров частично когерентного света при решении задач профилометрии, как гладких (шероховатость $< \lambda/8$, λ – длина волны света), так и технических поверхностей. Рассмотрены ограничения, связанные с применением интерференционных методов измерения рельефа поверхности при контроле промышленных изделий. Анализ научной литературы, выполненный автором, показал, что в настоящее время методами

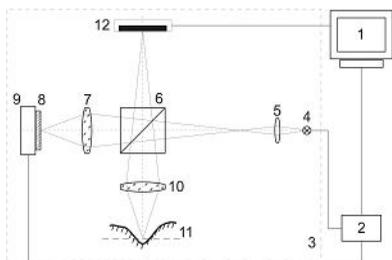


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации дифференциальных интерферограмм

измерения рельефа поверхности с использованием интерференции частично когерентного света. Предложенные автором методы развивают интерференционную профилометрию, основанную на продольном фазовом сдвиге, обеспечивая увеличение быстродействия и разрешающей способности, снижение погрешностей измерения, повышение надежности измерений. Автором предложены и исследованы: *метод дифференциальных интерферограмм, способ расчета адаптивного порога, трехзеркальный интерферометр частично когерентного света, метод допускового контроля на основе полизональной интерференции, метод частично сканирования коррелограмм для измерения нанорельефа поверхности.*

Метод дифференциальных интерферограмм (ДИ) для измерения рельефа технических поверхностей основан на получении набора ДИ с использованием интерферометра Линника и реконструкции по ним измеряемого рельефа. Экспериментальная установка (рис. 1) включает в себя компьютер 1, контроллер управления 2, интерферометр 3. Интерферометр состоит из источника частично когерентного света 4, согласующего объектива 5, светоделительного кубика 6,

опорного зеркала 8, двух идентичных объективов 7 и 10, измеряемого объекта 11. Опорное зеркало интерферометра 8 установлено на пьезокерамику 9.

Шаг и диапазон перемещения зеркала управляются персональным компьютером 1. Интерферограммы регистрируются ПЗС-камерой 12 и передаются в компьютер 1. При использовании частично когерентного света условие интерференции выполняется для волн, рассеянных измеряемой поверхностью в слое, толщина которого по высоте равна длине когерентности (слой когерентности)

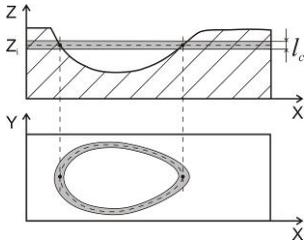


Рис. 2. Изолиния рельефа поверхности, связанная со слоем когерентности

l_c (рис. 2). Середина слоя когерентности определяет плоскость нулевой разности фаз интерферирующих волн для точек поверхности опорного зеркала интерферометра и сопряженных точек пространства предмета в измерительном плече. Так как плоскость максимальной видности интерференции совпадает с плоскостью изображения, то возникает задача отделить интерференцию от фона. Для ее решения автором предложено использовать две интерферограммы, в которых фаза интерференции сдвинута на угол 180^0 (половина полосы интерференции).

Сдвиг фазы осуществляется перемещением опорного зеркала, установленного на пьезокерамику, на величину $\bar{\lambda}/4$ вдоль оси интерферометра, где $\bar{\lambda}$ – эффективная длина волны света. По этим интерферограммам рассчитывается дифференциальная интерферограмма как разность двух исходных

$$\hat{I}(x, y, z - z_0) = I_2(x, y, z - z_0) - I_1(x, y, z - z_0) = A(z - z_0, l_c) \cdot \cos(4\pi(z - z_0) / \bar{\lambda}),$$

где I_1, I_2 – интенсивности исходных интерферограмм, сдвинутых на 180^0 ; z_0 – координата точки поверхности (x, y) ; $A(z - z_0, l_c)$ – огибающая для ДИ, зависящая от используемого источника света. Так, для источника света с гауссовой спектральной плотностью мощности $A(z - z_0, l_c) = 4 \exp[-4 \ln 2 \cdot (z - z_0)^2 / l_c^2]$. Амплитуда ДИ отлична от нуля только для слоя когерентности. На рис. 3 приведен экспериментальный график модуля амплитуды ДИ.

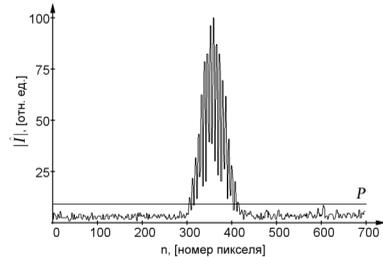


Рис. 3. Экспериментальный график модуля амплитуды ДИ

Интерферометр 3 (рис. 1) установлен на моторизованном программно-управляемом микрометрическом столе. Измерение высоты всего микрорельефа поверхности выполняется сканированием объекта по оси z с заданным шагом. Требуемая величина шага устанавливается программно. Для каждого положения z_i интерферометра регистрируются две интерферограммы с фазовым сдвигом, равным 180^0 , по которым рассчитывается ДИ. Высота рельефа $Z(x, y)$ для каждой точки (x, y) находится в соответствии с выражением:

$$Z(x, y) = \sum_{i \in h(x, y)} z_i \left| \hat{I}(x, y, z_i) \right| / \left| \sum_{i \in h(x, y)} \hat{I}(x, y, z_i) \right|,$$

где $h(x, y) = \{i \mid \hat{I}(x, y, z_i) \geq P\}$ – множество, содержащее номера шагов, в которых зарегистрирована интерференция; P – порог для обнаружения интерференции; $p(x, y) = |h(x, y)|$ – количество (мощность множества) обнаружений интерференции в точке (x, y) . Точки, для которых $p(x, y) = 0$, считаются неизмеренными.

Использование для выделения интерференции лишь двух интерферограмм позволяет достичь максимальной скорости измерений рельефа.

Способ расчета адаптивного порога (АП) решает задачу обнаружения интерференции для поверхностей с неравномерным рассеянием света по площади измерения (рис. 4). АП рассчитывается для каждой точки измеряемой поверхности (x, y) на каждом шаге сканирования z_i (для каждой ДИ) как величина, пропорциональная дисперсии квантового шума интенсивности интерференционного фона. Для адаптивного порога получено следующее аналитическое выражение:

$$P(x, y, z_i) = k \sqrt{\alpha \bar{U}(x, y, z_i)},$$

где \bar{U} – значение интенсивности интерференционного фона, k определяется требуемым отношением амплитуды полезного сигнала к шуму, а коэффициент α равен чувствительности используемой ПЗС-камеры. Показано, что использование АП позволяет расширить динамический диапазон обнаружения интерференции более чем в 10 раз и сделать процесс измерения рельефа полностью автоматиче-

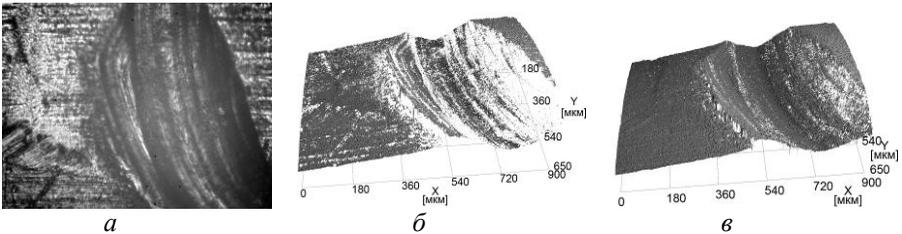


Рис. 4. Рельеф поверхности: исходный (а), реконструированный с применением фиксированного (б) и адаптивного (в) порогов

ским. Для измерений в автоматическом режиме необходимо лишь один раз задать величину коэффициента k , определяющего критерий обнаружения интерференции.

На рис. 4,а приведено изображение участка поверхности оболочки ТВЭЛ с дефектом типа "задир" с большим разбросом рассеивающих свойств света по площади и результаты измерений его рельефа с применением фиксированного (б) и адаптивного (в) порогов. Расчеты показали, что применение адаптивного порога дало возможность увеличить вероятность обнаружения интерференции с 76% до 96%, что позволило заметно повысить точность измерений.

Трехзеркальный интерферометр частично когерентного света. Измерение рельефа, основанное на сравнении искривления интерференционных линий с

эффективной длиной волны, выступающей "масштабом сравнения" в пространстве предмета, затруднено для технических поверхностей. Это связано с тем, что для таких поверхностей интерференционные линии фрагментируются (перестают различаться) и таким образом масштаб сравнения исчезает.

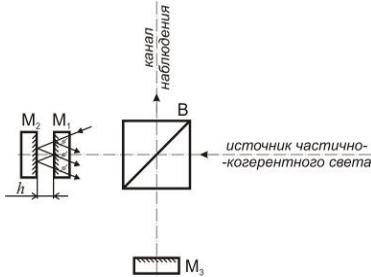


Рис. 5. Оптическая схема трехзеркального интерферометра

Для решения этой проблемы предложена оптическая схема нового *трехзеркального интерферометра частично когерентного света*, который позволяет получить *полизональную интерференцию*. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 5. Принципиальным является то, что расстояние между зеркалами M_1 и M_2 должно быть больше длины когерентности l_c . Это дает возможность получить не один, а множество

непересекающихся слоев когерентности. Получено аналитическое выражение, описывающее зависимость интенсивности света в полизональной интерферограмме от расстояния h между зеркалами M_1 и M_2 и коэффициентов отражения R_1 и R_2 зеркал. Для источника света с гауссовой спектральной плотностью мощности выражение для полизональной интерференции имеет вид:

$$I(z, h) = I_0 \left(1 + 2 \cdot b \cdot \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cdot \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{z - m \cdot h}{l_c} \right)^2 \right] \cdot \cos \left(4 \cdot \pi \left(\frac{(z + m \cdot h)}{\bar{\lambda}} \right) \right) \right),$$

где b – коэффициент отражения светоделителя В, $m \in 0, 1, 2, \dots$ – порядок отражения волны, $a_m(R_1, R_2)$ – коэффициент отражения m – го порядка. На рис. 6 приведен график интерференции, рассчитанный в зависимости от положения z зеркала M_3 для восьми порядков отражения m и источника света с гауссовой спектральной плотностью мощности при $\bar{\lambda} = 528$ нм, $l_c = 5$ мкм, $R_1 = 0,37$, $R_2 = 0,9$, $h = 12$ мкм. Ширина каждого слоя когерентности равна l_c , а расстояние между ними по оси z равно расстоянию h между зеркалами M_1 и M_2 (рис. 6). Амплитуда порядков интерференции определяется коэффициентами отражения R_1 и R_2 зеркал M_1 и M_2 . Трехзеркальный интерферометр

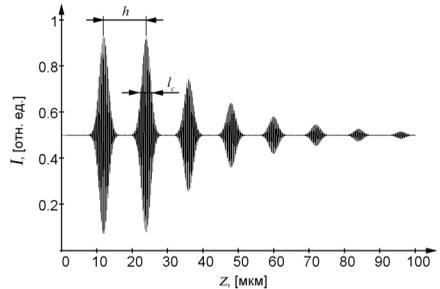


Рис. 6. Вид интерференции в трехзеркальном интерферометре для восьми порядков отражения

позволяет установить масштаб в пространстве измерения, равный расстоянию h . Это решает задачу измерения рельефа *технических поверхностей* по одной

интерферограмме (или по одной дифференциальной интерферограмме) без сканирования по высоте.

Допусковый контроль рельефа поверхности. При контроле продукции

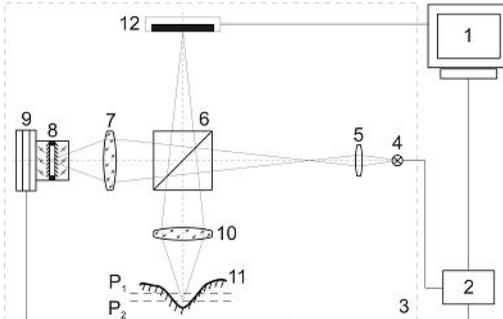


Рис. 7. Схема экспериментальной установки с трехзеркальным интерферометром

промышленного производства требуется с высокой скоростью оценивать величину локального отклонения профиля поверхности (допусковый контроль) на измеряемом изделии. Необходимость таких оценок встречается в дефектоскопии поверхностей ответственных промышленных изделий на этапе контроля их качества. В этом случае критичной является глубина дефекта. Для увеличения производительности контроля предложен метод

с использованием полизональной интерференции, получаемой при помощи трехзеркального интерферометра. Схема установки для проведения допускового контроля приведена на рис. 7. Схема подобна той, что приведена на рис. 1, за исключением элемента 8. Вместо зеркала с одной отражающей поверхностью в опорное плечо интерферометра установлен двухзеркальный блок. Сущность метода заключается в том, что с рельефом контролируемой поверхности связывается относительное положение ряда слоев когерентности полизональной интерференции. Расстояние между слоями когерентности устанавливается равным предельно допустимому локальному отклонению рельефа поверхности. Для контроля поверхности могут использоваться как отдельные интерферограммы, так и дифференциальные. В области измерения каждому порядку отраженных волн соответствуют слои когерентности (P_1 , P_2) (рис. 8). На ПЗС-матрице регистрируются зоны интерференции, соответствующие каждому слою когерентности. В эксперименте использовалась оптическая система с размером зоны измерения $2,4 \times 1,8$ мм. Расстояние h между зеркалами равнялось 12 мкм. В качестве осветителя использовалась галогенная лампа накаливания с длиной когерентности света $l_c = 5$ мкм. На рис. 9 приведены полизональные обычные и дифференциальные интерферограммы для двух дефектов разной глубины на металлической поверхности. На основе анализа только одной дифференциальной интерферограммы можно установить, что глубина одного дефекта менее 15 мкм (a , b), а глубина другого более 15 мкм ($в$, $г$).

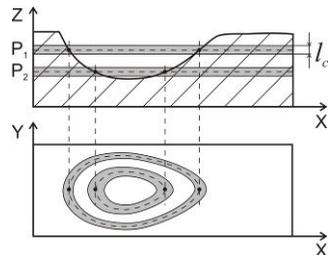


Рис. 8. Изолинии 3D рельефа поверхности для двух порядков полизональной интерференции

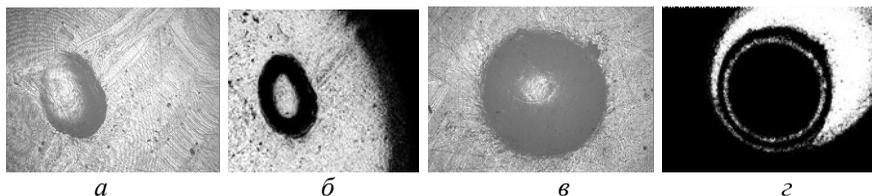


Рис. 9. Полизональные обычные (а, в) и дифференциальные интерферограммы (б, з) для плоской металлической поверхности, содержащей дефекты глубиной 13,4 мкм (а, б) и 42,4 мкм (в, з)

Измерение нанорельефа поверхности основано на частичном сканировании коррелограмм, осуществляемом перемещением опорного зеркала интерферометра вдоль оси. Перемещение производится с шагом $\Delta z = 4$ нм в диапазоне менее 1 мкм. Схема экспериментальной установки подобна той, что представлена на рис. 1. Длина оптического пути в опорном плече интерферометра регулируется напряжением на пьезокерамике, которая подключена к контроллеру 2. В качестве источника частично когерентного света 4 используется светодиод. Шаг и диапазон перемещения опорного зеркала устанавливается программно компьютером 1. Интерферограммы регистрируются на ПЗС-камере 12 и передаются в компьютер, где при помощи специальных алгоритмов производится их обработка и расчет рельефа поверхности.

При перемещении опорного зеркала вдоль оптической оси регистрируемую на ПЗС-матрице интенсивность света (амплитуду коррелограммы) $I_{ij}(z_k)$ в каждом пикселе с номером j и строки i можно описать функцией

$$I_{ij}(z_k - z_{ij}^0) = I_{ij}^0 (1 + A_{ij}(z_k - z_{ij}^0) \cos(4\pi(z_k + z_{ij}^0) / \lambda + \phi_{ij})),$$

где $z_k = k\Delta z$, $k \in (0, 1, \dots, K)$; K – максимальный номер шага, причем $K\Delta z \ll l_c$; I_{ij}^0 – постоянная составляющая интенсивности, A_{ij} – огибающая коррелограммы,

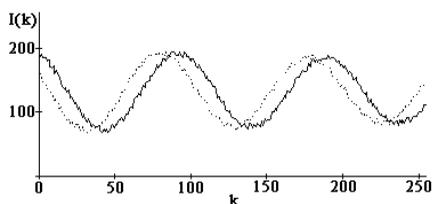


Рис. 10. Фрагменты коррелограмм для двух пикселей (k – номер шага)

зависящая от используемого источника света и рассеивающих свойств поверхности; z_{ij}^0 – положение точки поверхности в измерительном плече интерферометра относительно середины слоя когерентности; ϕ_{ij} – фаза отраженной волны света, связанная со свойствами материала поверхности (для поверхности из однородного материала $\phi_{ij} = \text{const}$). Для получения

нескольких периодов коррелограммы (частичное сканирование) диапазон перемещения опорного зеркала интерферометра может быть значительно меньше l_c . В процессе сканирования для каждого пикселя регистрируются фрагменты (обозначенные верхним индексом f) коррелограмм $I_{ij}^f(z_k)$. Интенсивность $I_{ij}(z_k)$ с

учетом неоднородности a_{ij} рассеяния света измеряемой поверхностью и неравномерности (среднего значения) освещенности b_{ij} поверхности ПЗС-матрицы можно записать как

$$I_{ij}(z_k) = a_{ij} I_{ij}^f(z_k) + b_{ij}.$$

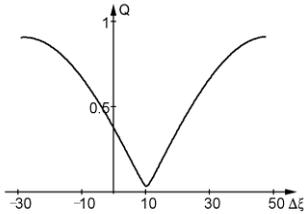


Рис. 11. График функции рассогласования коррелограмм $Q(\Delta\xi)$ ($\Delta\xi$ – сдвиг между коррелограммами в единицах шагов сканирования)

$$Q(\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq}) = \frac{1}{K - \Delta\xi_{nq}} \sqrt{\theta + \sum_{k=0}^{k=(K-\Delta\xi_{nq})} (I_{lm}^f(k) - I_{nq}^f(k + \Delta\xi_{nq}))^2}.$$

Здесь $\Delta\xi$ – непрерывный интерполирующий параметр (вместо целочисленного параметра k), $k = (\xi)$ – целая часть ξ . Параметр θ определяется выбранным видом межпиксельной интерполяции. На рис. 11 показан график функции Q для коррелограмм, приведенных на рис. 10. Минимум функции $Q(\Delta\xi)$ соответствует значению сдвига $\Delta\xi$, при котором сравниваемые коррелограммы совпадают наиболее полно. По сдвигу $\Delta\xi_{nq}$ рассчитывается изменение высоты профиля поверхности

$$\Delta h_{nq} = \Delta\xi_{nq} \cdot \Delta z.$$

Функция $Q(\Delta\xi)$ периодична по

параметру $\Delta\xi$ с периодом $\bar{\lambda}/2$.

В качестве подтверждения высокой разрешающей способности метода частичного сканирования коррелограмм на рис. 12 приведен результат измерения одноатомных ступеней на поверхности кристаллического кремния. Ширина ступенек составляет 20 мкм, а высота – 0,314 нм. Экспериментально показано, что

Фрагменты коррелограмм для двух произвольно выбранных пикселей приведены на рис. 10. Смещение Δk между коррелограммами определяется изменением высоты рельефа $\Delta h = \Delta k \cdot \Delta z$ между участками поверхности, проецируемыми на эти пиксели. Задача нахождения сдвига Δk_{nq} между коррелограммами в точках (l, m) и (n, q) решалась численно методом последовательных приближений с минимизацией среднеквадратического отклонения по области пересечения функции рассогласования коррелограмм

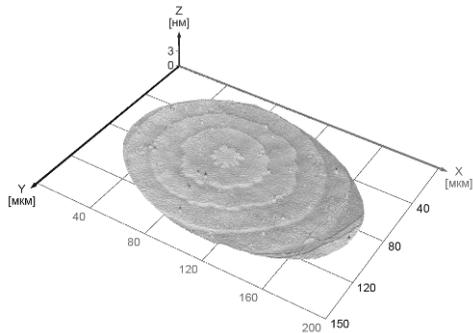


Рис. 12. Измеренный 3D нанорельеф одноатомных ступенек высотой 0,314 нм

среднеквадратическое отклонение высоты рельефа, содержащего одноатомные ступени, составляет менее 0,05 нм.

Для проведения экспериментальных и модельных исследований методов и устройств измерения микро- и нанорельефа поверхности автором было создано программное обеспечение (ПО). Структура ПО представлена на рис. 13. Программное обеспечение создано в среде Visual Studio 6.0 с использованием языка программирования Visual C++ для работы в операционной системе MS Windows. Оно позволяет управлять узлами интерферометра, производить сканирование рельефа в режиме микро- и наноизмерений, производить реконструкцию рельефа, настраивать различные режимы сканирования и реконструкции, моделировать режимы измерений, устанавливать параметры моделей, проводить анализ результатов измерений и работать с архивами данных.

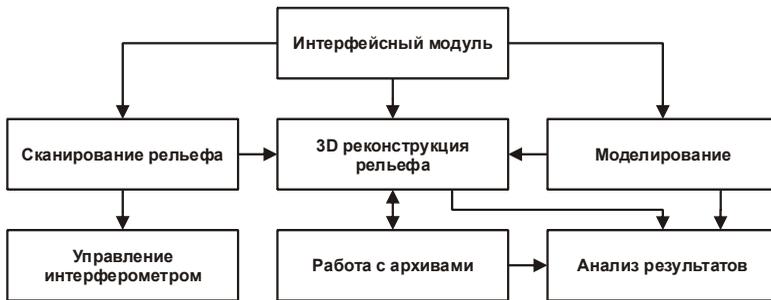


Рис. 13. Структура ПО для проведения экспериментальных и модельных исследований методов и устройств для измерения микро- и нанорельефа поверхностей

В третьей главе исследованы основные факторы, влияющие на погрешно-

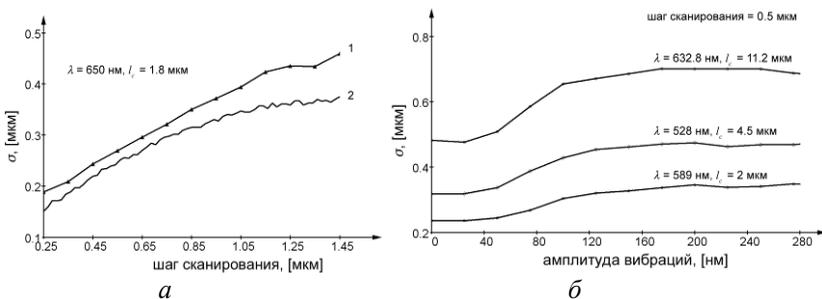


Рис. 14. Зависимости разрешающей способности измерений от шага сканирования (а) (1 – эксперимент, 2 – моделирование) и от амплитуды вибрации (б), полученные путем моделирования для трех длин когерентности и длин волн

сти интерференционных измерений рельефа поверхности. Определены оптимальные режимы измерений. Исследовано влияние величины шага сканирования, длины когерентности и амплитуды вибраций на случайную погрешность

измерений σ для метода дифференциальных интерферограмм, определяемую как среднеквадратическое отклонение заданного рельефа от измеренного. На рис. 14,а приведен график зависимости погрешности измерений от шага сканирования, а на рис. 14,б – от уровня вибраций. Амплитуда вибраций устанавливалась как случайная величина неопределенности (в диапазоне от 0 до 280 нм) сдвига опорного зеркала на величину $\lambda/4$ при получении второй интерферограммы (для расчета ДИ). На рис. 14,б видно, что даже при максимальном уровне вибраций погрешность измерений увеличивается лишь на 15% (для $l_c = 2$ мкм). Это свидетельствует об устойчивости метода измерения рельефа технических поверхностей на основе ДИ к вибрациям. Видно, что погрешность измерения снижается при уменьшении шага сканирования.

Влияние длины когерентности света l_c на погрешность σ определялось путем моделирования измерения рельефа поверхности с использованием ДИ (рис. 15). С уменьшением l_c погрешность снижается, однако при этом увеличивается число неизмеренных точек (число пропусков K). Показано, что при заданной допустимой погрешности можно подобрать длину когерентности, обеспечивающую максимальную скорость измерений. При измерении рельефа поверхностей с использованием метода частичного сканирования коррелограмм исследовано влияние уровня шума в интерферограммах и нанонеровностей опорного зеркала

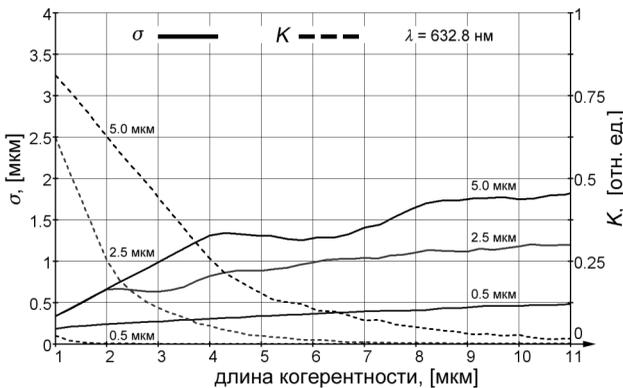


Рис. 15. Графики расчетных зависимостей погрешности измерения от длины когерентности и при различных шагах от 0,5 мкм до 5 мкм (пунктирными линиями показан коэффициент пропусков K)

интерферометра на разрешающую способность измерений. Изучено влияние хроматических aberrаций оптической схемы интерферометра на систематическую погрешность измерений.

Экспериментально показано, что при использовании атомно-гладкого зеркала (поверхность кристалла Si) в опорном плече интерферометра среднеквадратическое отклонение по высоте рельефа, содержащего одноатомные ступени, составляет менее 0,05 нм.

В четвертой главе приведены результаты проведенных исследований, которые послужили теоретической и экспериментальной базой для создания интерференционной измерительной системы "Профиль" и универсального автоматизированного цифрового интерференционного микроскопа-профилометра МНП-1.

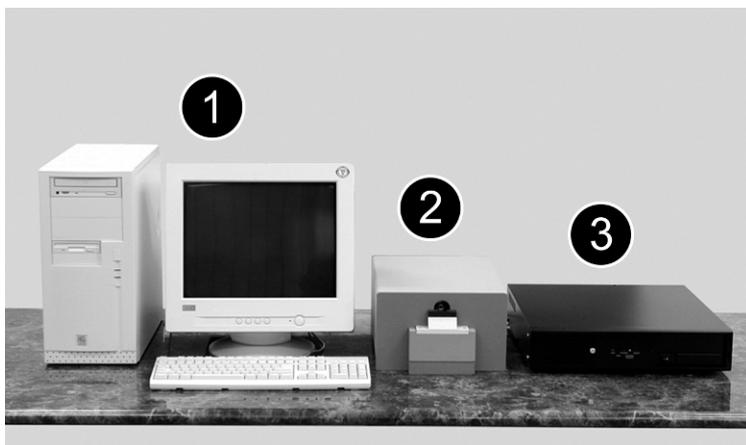


Рис. 16. Общий вид системы "Профиль": 1 – компьютер, 2 – оптико-механический блок, 3 – контроллер управления

Система "Профиль" (рис. 16) предназначена для измерения рельефа и глубины дефектов на поверхности ТВЭЛ. Разработанная и изготовленная в КТИ НП СО РАН, она прошла государственные испытания об утверждении типа средств измерений "Систем автоматизированных бесконтактного контроля глубины и профиля дефектов поверхности оболочки и концевых деталей ТВЭЛ" под №24403-03.

Приведено описание режимов рабочей программы (созданной в соавторстве) для измерительной системы "Профиль". Её основные технические характеристики представлены в таблице.

Контролируемые параметры	Экспериментальные результаты
Размеры зоны контроля, мм	2,3 × 2,3
Диапазон глубины измеряемых дефектов, мкм	от 9 до 199
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений с доверительной вероятностью 0,95, мкм	±2,3
Время контроля одного участка с дефектом глубиной 40 мкм, с	15

Три системы на протяжении 8 лет успешно используются в производственных линиях на Новосибирском предприятии ОАО «НЗХК» (Росатом). Их применение позволило улучшить качество выпускаемых предприятием тепловыделяющих сборок атомных реакторов типа ВВЭР и PWR.

Созданный и разработанный в КТИ НП СО РАН опытный образец универсального интерференционного цифрового микроскопа-профилометра МНП-1

(рис. 17) работает в двух режимах: микро- и наноизмерение. МНП-1 имеет следующие технические характеристики:

Микроизмерение:

- диапазон измерений от 0 до 10 мм,
- разрешение по высоте 0,1 мкм,
- поперечное разрешение 1,7 / 0,8 / 0,3 мкм,
- площадь измерения до 2,4×1,8 / 1,1×0,8 / 0,4×0,3 мм².

Наноизмерение:

- диапазон измерений от 0 до 50 мкм,
- разрешение по высоте 0,1 нм,
- поперечное разрешение 1,7 / 0,8 / 0,3 мкм,
- площадь измерения до 2,4×1,8 / 1,1×0,8 / 0,4×0,3 мм².

Микроскоп МНП-1 может быть использован для решения широкого круга производственных, измерительных и исследовательских задач.

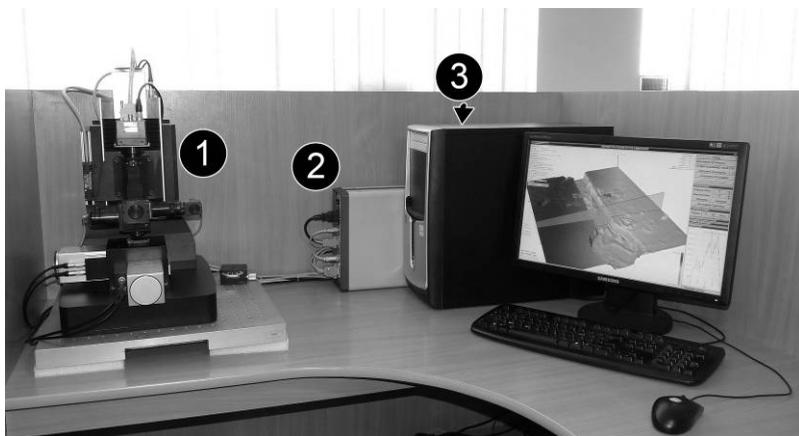


Рис. 17. Общий вид микроскопа-профилометра МНП-1: 1 – оптико-механический блок, 2 – контроллер управления, 3 – компьютер

Он имеет высокий уровень автоматизации процесса измерения. Созданное программное обеспечение имеет широкий набор средств обработки результатов, уникальные встроенные средства моделирования и современный графический интерфейс.

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертации:

1. Предложен и исследован быстродействующий метод измерения рельефа поверхности на основе дифференциальных интерферограмм в частично когерентном свете, позволяющий получить разрешение по высоте менее 0,2 мкм в диапазоне не менее 10 мм.

2. Разработана и исследована оптическая схема трехзеркального интерферометра, обеспечивающая формирование полизональной интерференции в частично когерентном свете. Впервые получено аналитическое выражение для этого вида интерференции.

3. Предложен и исследован метод допускового контроля, основанный на полизональной интерференции, дающий возможность обнаруживать предельные отклонения рельефа без сканирования по высоте, что на порядок повышает производительность работы.

4. Получено выражение для автоматического расчета адаптивного порога обнаружения интерференции для поверхностей с неравномерным рассеянием света по измеряемой площади. Использование адаптивного порога расширяет динамический диапазон обнаружения интерференции более чем в 10 раз и повышает вероятность ее нахождения до 96%.

5. Создан комплекс программ, позволяющий на моделях исследовать технические и программно-алгоритмические решения, ориентированные на применение их в оптической интерференционной микро- и нанопрофилометрии.

6. На основе предложенных методов, экспериментальных исследований и компьютерного моделирования предложены технические и программно-алгоритмические решения, положенные в основу разработанных оптико-электронных измерительных систем.

7. Впервые в России создана, сертифицирована и внедрена в ОАО «НЗХК» (Росатом) оптико-электронная система «Профиль» для автоматического контроля дефектов поверхности оболочки ТВЭЛ в технологических линиях их производства. Система позволяет измерять в автоматическом режиме глубину и профиль дефектов с погрешностью $\pm 2,3$ мкм и разрешением по глубине 0,4 мкм. Она отличается высокой производительностью, достоверностью результатов измерения, надежностью работы в производственных условиях. Три образца системы с 2002 г. успешно эксплуатируются в цеховых условиях предприятия, что позволило повысить качество выпускаемых тепловыделяющих сборок атомных реакторов ВВЭР и PWR.

8. Предложен и исследован высокоразрешающий бесконтактный интерференционный метод измерения нанорельефа поверхностей на основе частичного сканирования коррелограмм в диапазоне менее 1 мкм с разрешением по высоте менее 0,05 нм.

9. На основе предложенных методов измерения микро- и нанорельефа поверхности впервые в России создан опытный образец универсального интерференционного микроскопа-профилометра МНП-1, работающего в двух режимах: микро- и наноизмерений. В режиме микроизмерений МНП-1 обеспечивает 3D измерение в диапазоне до 10 мм по высоте с разрешением 0,1 мкм. В режиме наноизмерений разрешение по высоте составляет 0,1 нм, а диапазон – 50 мкм. Поперечное разрешение в двух режимах работы микроскопа-профилометра меняется от 0,3 мкм до 1,7 мкм, а площадь измерения – от 0,3 мм² до 2,4 мм².

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. И.В. Голубев, Е.В. Сысоев, Ю.В. Чугуй Измерение поверхностных дефектов на основе низкокогерентной интерферометрии // Датчики и системы. – 1999. - № 6. – С. 25-30.

2. Е.В. Сысоев, И.В. Голубев, Ю.В. Чугуй, В.А. Шахматов Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 4-13.

3. Е.В. Сысоев, И.В. Голубев Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515, 2005.

4. Ю.В. Чугуй, А.М. Блинов, О.А. Веретенников, И.В. Голубев, А.А. Гушина, М.Г. Зарубин, П.И. Лавренюк, В.И. Ладыгин, А.Ф. Лосицкий, Ю.К. Карлов, К.И. Кучинский, А.Н. Петров, Ю.В. Пименов, С.В. Плотников, В.В. Рожков, Е.В. Сысоев, В.Б. Филиппов, И.Г. Чапаев, Г.С. Черемных, В.П. Юношев 3D оптические измерительные технологии для атомной промышленности // Сборник "Вопросы Атомной Науки и Техники", выпуск №59, часть 1, с. 49

5. Ю.В. Чугуй, А.М. Блинов, О.А. Веретенников, И.В. Голубев, А.А. Гушина, М.Г. Зарубин, П.И. Лавренюк, В.И. Ладыгин, А.Ф. Лосицкий, Ю.К. Карлов, К.И. Кучинский, А.И. Пастушенко, А.Н. Петров, Ю.В. Пименов, С.В. Плотников, В.В. Рожков, Е.В. Сысоев, В.Б. Филиппов И.Г. Чапаев, Г.С. Черемных, В.П. Юношев Комплекс оптико-электронных средств для атомной промышленности // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 2. – С. 60-70.

6. Сысоев Е.В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микрорельефа поверхностей // Автометрия. – 2007, Т. 43. – № 1. – С. 107-115.

7. Evgeny V. Sysoev Nanorelief measurements errors for a white-light interferometer with chromatic aberrations // Key Engineering Materials. – 2010. – V. 437. – p. 51-55

8. Evgeny V. Sysoev, Rodion V. Kulikov Microrelief measurements for white-light interferometer with adaptive algorithm interferogram processing // Key Engineering Materials. – 2010. – V. 437. – p. 35-39

9. Е.В. Сысоев, И.А. Выхристюк, Р.В. Куликов, А.К. Поташников, В.А. Разум, Л.М. Степнов Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – № 2. – с. 119-128