

На правах рукописи

Золотаревский Сергей Юрьевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА И ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

05.11.15- метрология и метрологическое обеспечение

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва, 2010г.

**Работа выполнена в Федеральном Государственном унитарном
предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»)**

Научный руководитель

Доктор технических наук

С.А. Кононогов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Г.И. Василенко

кандидат технических наук, с.н.с.

Ю.А. Торопов

Ведущая организация: Российский научный центр «Курчатовский
институт»

Защита состоится «___»_____2010 г. на заседании
диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС» по адресу:
119361, Москва, ул. Озерная, 46, ауд. 1005.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан «___»_____2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук

В.Г.Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время в ведущих странах мира с развитой инновационной экономикой нанотехнологии, наноматериалы и продукция на их основе начинают занимать все более значимое место в рамках таких высокотехнологичных отраслей, как авиационно-космическая промышленность и двигателестроение; судостроительная и автомобильная промышленности; атомный энергопромышленный комплекс и энергосберегающие технологии; радиоэлектронная промышленность и информационно-телекоммуникационные технологии; производство медицинской диагностической аппаратуры, биочипов и имплантатов; фармацевтическая промышленность и защита окружающей среды, косметика и продукты питания.

Указанные отрасли являются сферой жесткой глобальной конкуренции. Их модернизация требует соответствующего научно-технологического развития, применения нанотехнологий как основы повышения их конкурентоспособности. В России на развитие указанных отраслей экономики направлен ряд стратегий, долгосрочных федеральных государственных программ и комплексов мер, в соответствии с которыми развитие nanoиндустрии в стране осуществляется по таким направлениям, как наноэлектроника, nanoинженерия, нанобиотехнологии, высокочистые вещества, конструкционные и композитные функциональные наноматериалы для энергетики, космической техники, а также для систем безопасности.

При реализации большинства перечисленных направлений возникают измерительные задачи, связанные с количественной и качественной оценкой геометрических параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне, что, в свою очередь, порождает актуальную проблему метрологического обеспечения данного вида измерений в

различных отраслях науки и промышленности. Решение задачи развития серийного производства в области нанотехнологий требует совершенствования методов и средств измерений этих параметров, без чего не могут быть достигнуты требуемая стабилизация технологий, воспроизводимость результатов прецизионных измерений, минимизация привносимых дефектов. Сложность обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне обусловлена, с одной стороны, – отсутствием достаточного количества исследований и публикаций в данной области, с другой стороны – недостаточной изученностью специфики измерительных задач, связанных с учетом процессов взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с исследуемыми наноструктурами.

Особенно актуальны достоверные количественные оценки величин и параметров твердых тел, имеющих отношение к 3D-размерностям рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне. Методам получения подобной достоверной измерительной информации средствами интерферометрии высокого разрешения и посвящена данная работа.

Специфика наноструктуры поверхностей, необходимость реализации методов и средств измерений с высоким разрешением, создание калибровочных возможностей для уникальной измерительной аппаратуры свидетельствуют об актуальности создания измерительно-калибровочного комплекса и нормативно-методической базы для обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне.

При этом наряду с современными сканирующими зондовыми микроскопами, работающими в контактном и бесконтактном режимах, получают распространение **бесконтактные методы профилометрии, базирующиеся на принципах лазерной интерферометрии высокого разрешения (порядка $\lambda/800$)**. Особо следует отметить, что интенсификация

исследований в различных направлениях нанотехнологий, физической и коллоидной химии, биомедицины потребовала разработки методов и средств измерений различных свойств, характеристик, параметров прозрачных (фазовых) и непрозрачных для видимого излучения нанообъектов.

Исходя из изложенного, в данной диссертационной работе ставится **цель: разработка и исследование методов и средств интерферометрии высокого разрешения для обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне.**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

- провести теоретические исследования особенностей процессов взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с исследуемыми наноразмерными объектами при формировании интерферограмм и обосновать подходы к решению задачи моделирования рассеяния оптического излучения на проводящих и диэлектрических наноразмерных структурах;
- провести теоретические исследования метода фазовых шагов в целях его адаптации для автоматического получения и обработки интерферограмм при измерении параметров рельефа и шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения;
- разработать калибровочную установку на базе автоматизированного лазерного интерференционного микропрофилометра (АИМ) с разрешением $\lambda/800$ и провести соответствующие метрологические исследования;
- провести испытания мер, разработать и аттестовать методики измерений и калибровки средств измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне, гармонизированные с международными требованиями и рекомендациями.

Методы и средства исследований

Исследования осуществлялись: методами математической статистики и теории вероятностей; имитационным моделированием особенностей взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с наноразмерными объектами при формировании интерферограмм; численным тестированием алгоритмов решения задач рассеяния оптического излучения наноструктурами; статистическим анализом точности алгоритмов обработки интерферометрической информации о шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне.

Экспериментальные исследования эталонных мер и тест-объектов рельефа наноповерхности выполнялись методами интерференционной микроскопии, в том числе интерферометрии белого света, и сканирующей зондовой (преимущественно атомно-силовой и туннельной) микроскопии.

Научная новизна

Получены следующие научные результаты:

1. В процессе исследования методами имитационного моделирования особенностей взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с нанообъектами при формировании интерферограмм:

- построены математические модели и решена задача рассеяния зондирующего оптического излучения методом конечных элементов для изолированных наноразмерных неоднородностей поверхности, а также для поверхности периодического профиля;
- решена задача рассеяния для неоднородных структур вблизи отражающих поверхностей и выполнено численное моделирование процедуры восстановления рельефа поверхности с учетом рассеяния излучения на наноструктурах.

2. При изучении фазовой микроскопии поверхностей фазовых объектов в нанометровом диапазоне:

- выполнен анализ чувствительности метода фазовых шагов (МФШ) к влиянию источников неопределенности вычисления фазы, на модельных и реальных интерферограммах экспериментально подтверждены результаты теоретического исследования точностных характеристик алгоритмов МФШ;
- теоретически обоснована и экспериментально подтверждена на модельных и реальных интерферограммах эффективность методов калибровки фазосдвигающего устройства лазерного интерференционного микроскопа.

Практическая значимость

1. Практически реализованы методы решения задачи рассеяния оптического излучения на проводящих и диэлектрических структурах нанометрового диапазона масштабов, разработано соответствующее программное обеспечение, проверены разработанные алгоритмы численного моделирования экспериментов по оптической микроскопии различных наноструктур.

2. Проведена модернизация программно-алгоритмической компоненты лазерного интерферометра на основе использования методов фазовых шагов, позволившая добиться оценки геометрических параметров рельефа поверхности наблюдаемых наноструктур по данным оптической микроскопии с разрешением до $\lambda/800$.

3. В рамках реализации Федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008-2010 гг.» проведены испытания и введены в эксплуатацию калибровочные установки на основе автоматизированного лазерного интерферометра и интерферометра-профилометра белого света, с аттестованным набором эталонных мер и методик калибровки, содержащих расчет бюджета неопределенности.

4. Разработан комплекс проектов национальных стандартов в области прецизионной интерферометрии высокого разрешения, гармонизированных с

ISO 14999 – 1, 2, 3 (Терминология и основные соотношения; Измерения и оценка результатов; Калибровка интерферометров, методика измерений).

Выпуск указанных стандартов предусмотрен планом национальной стандартизации 2010 года.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Дифракция зондирующего оптического излучения, возникающая в результате его поперечно-электрической и поперечно-магнитной поляризации при взаимодействии с проводящими и диэлектрическими наноструктурами, может быть учтена моделированием с использованием строгих аналитических решений векторных уравнений электромагнитного поля и применением метода конечных элементов при решении задач рассеяния излучения на профиле рельефа исследуемой поверхности.

2. Оптическая микроинтерферометрия с реконструкцией фазы методом фазовых шагов является эффективным методом при количественной оценке структуры, геометрии и топографии нанообъектов. Для выделения гармоник нулевого порядка наиболее эффективным является 7-шаговый самокалибрующийся алгоритм вычисления фазы.

3. Неопределенность типа В вычисления фазы для лазерного автоматизированного интерферометра может быть уменьшена за счет подавления высших гармоник и юстировки фазосдвигающего устройства. Неопределенность типа А вычисления фазы прямо пропорциональна неопределенности измерения интенсивности интерференционной картины и убывает в зависимости от числа шагов и контраста интерференционной картины.

4. Повышение уровня разрешения лазерного автоматизированного интерферометра до $\lambda/800$ может быть достигнуто за счет модернизации оптико-электронной части и его программно-алгоритмической компоненты.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на:

XVII и XVIII Всероссийских научно-технических конференциях «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2008 и 2009 г.г.;

Международной научно-практической конференции Метрология-2009 COOMET, Беларусь, г. Минск, 2009г.

Публикации

По результатам исследований и разработок опубликованы 12 печатных работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Диссертация содержит 150 страниц машинописного текста, 74 рисунка, список литературы из 111 наименований. Приложения содержат 85 страниц, 48 рисунков.

Содержание диссертации

Во **Введении** обоснованы постановка темы и актуальность ее выполнения, сформулированы цель и основные подлежащие решению научно-технические задачи, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту. При этом отмечается, что в настоящее время особую актуальность приобретают бесконтактные методы профилометрии, базирующиеся на принципах лазерной интерферометрии высокого разрешения (порядка $\lambda/800$).

В **первой главе** выполнен аналитический обзор методов и средств измерений шероховатости поверхности. В **первом разделе** обзора содержится анализ состояния 3D-метрии шероховатости и рельефа поверхностей в нанометровом диапазоне. Проанализированы зависимости, характеризующие рельеф и шероховатость поверхности; состояние интерференционных координатных измерений параметров рельефа и

шероховатости поверхности; состояние метрологической обеспеченности сканирующей зондовой микроскопии и приборно-инструментального обеспечения 3D-метрии наношероховатости.

Второй раздел обзора посвящен анализу состояния нормативно-методической базы 3D-метрии геометрических параметров рельефа и шероховатости поверхности, а **третий раздел** – отечественной системы обеспечения единства измерений параметров шероховатости R_a и R_z .

Аналізу состояния зарубежной стандартизации в области измерений параметров шероховатости поверхности посвящен **четвертый раздел первой главы**.

На основе проведенного анализа показано существенное различие в топографической и профильной оценках вероятностных характеристик параметров шероховатости. Сравнение необходимого числа измерений для получения заданной точности и степени достоверности микро топографических и профильных параметров показало, что микро топографические параметры при тех же точностных требованиях нуждаются в гораздо меньшем числе измерений. Статистическая устойчивость микро топографических параметров объясняется тем фактом, что базовая площадка шероховатой поверхности, естественно, содержит гораздо больше информации, чем сечение поверхности с длиной, равной базовой; данный вывод говорит о важности пространственных оценок поверхности и о перспективности развития средств измерений, позволяющих сканированием поверхности ускорять процесс определения микро топографических параметров.

На основе сравнения микро топографических параметров шероховатости и их профильных аналогов, а также анализа их взаимосвязи с эксплуатационными свойствами поверхностей показаны актуальность и необходимость развития прямых топографических методов измерений, в первую очередь - для совершенствования существующих и разработки новых косвенных топографических и профильных методов измерений параметров

шероховатости. Это особенно важно для непосредственной оценки показателей качества поверхности в ответственных случаях, для которых замена топографических измерений на профильные приводит к существенному различию результатов.

Результаты аналитического обзора позволили подвести итоги и определить первоочередные направления теоретических и экспериментальных исследований, а также обосновать перечень подлежащих решению в диссертации задач.

Во второй главе описаны результаты теоретических исследований, обоснован выбор методов измерений и алгоритмов обработки измерительной информации о параметрах рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне.

Целью рассматриваемых в данной главе теоретических исследований являются анализ специфики измерительных задач, поиск путей повышения информативности и точности измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне бесконтактными методами интерферометрии высокого разрешения. В соответствии с поставленной целью основными задачами исследований явились:

- теоретические исследования особенностей взаимодействия зондирующего электромагнитного (оптического диапазона) излучения с наноразмерными объектами при формировании интерферограмм и анализ подходов к решению задачи рассеяния оптического излучения на проводящих и диэлектрических наноразмерных структурах методами моделирования;

- теоретическое обоснование и адаптация метода фазовых шагов для разработки программно-алгоритмического продукта, обеспечивающего измерение и автоматическую обработку результатов определения шероховатостей поверхностей в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения.

Одним из важнейших физических факторов, оказывающих влияние на

формирование неопределенности результатов измерений, является рассеяние наноструктурами зондирующего электромагнитного излучения оптического диапазона. Это обусловлено явлением дифракции зондирующего электромагнитного излучения при взаимодействии с исследуемыми наноструктурами в результате поперечно-электрической ($\mathbf{E} \parallel O_y$) и поперечно-магнитной ($\mathbf{H} \parallel O_y$) поляризаций оптического излучения. В связи с очевидными методическими и техническими трудностями получения экспериментальных данных о процессах рассеяния излучения наноструктурами оказалось целесообразным предварительно смоделировать подобные эксперименты. Для практических целей оптической интерференционной микроскопии большой интерес представляет получение строгих решений задач рассеяния оптического излучения наноразмерными объектами на основе векторных уравнений электромагнитного поля. Поэтому сначала применительно к геометрии простейшего полуцилиндрического тест-объекта (рис. 1, 2) было получено строгое аналитическое решение, а затем методом конечных элементов решалась задача рассеяния как для изолированных наноразмерных неоднородностей поверхности, так и для геометрии симметричного прямоугольного гребенчатого профиля.

На объект падает под произвольным углом к плоскости поверхности и перпендикулярно образующей цилиндрической неоднородности профиля плоская монохроматическая световая волна, выраженная формулой (1),

$$u_0(x, y) = \exp(ik_x x - ik_y y), \quad (1)$$

поляризованная таким образом, что вектор напряженности электрического поля направлен параллельно плоскости поверхности и образующей цилиндра (k_x, k_y – компоненты волнового вектора). Так же будет поляризовано и рассеянное на объекте излучение, регистрируемое микроскопом. Напряженность электрического поля удовлетворяет уравнению Гельмгольца во всем пространстве над плоскостью и равна нулю на идеально проводящей поверхности.

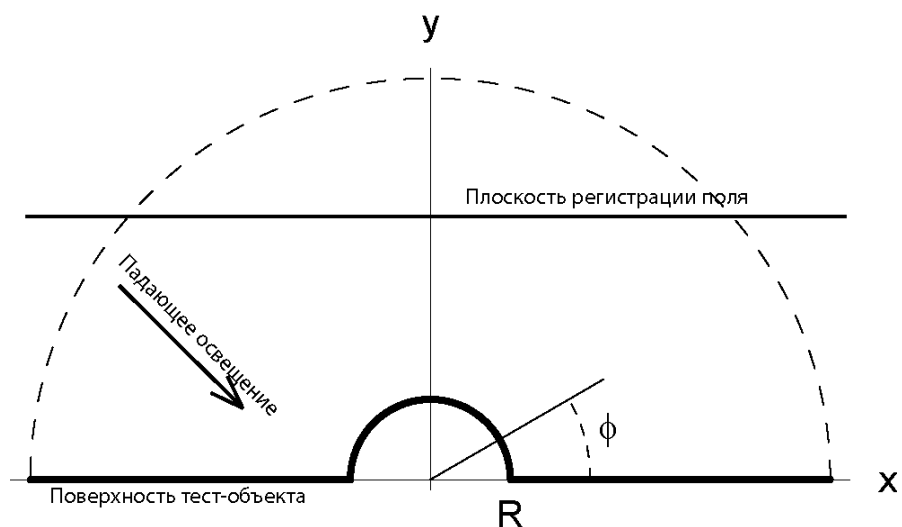


Рисунок 1 - Геометрия простейшего полуцилиндрического тест-объекта.

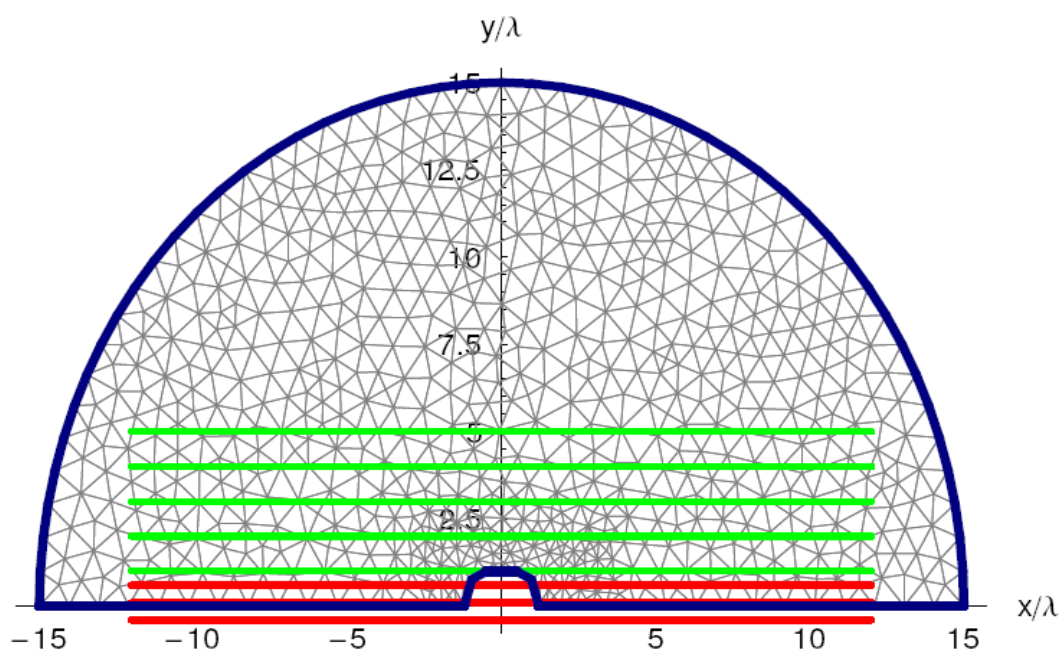


Рисунок 2 - Геометрия задачи рассеяния световых волн на неоднородной поверхности.

Тогда полная напряженность неизвестного электрического поля будет равна сумме

$$E = -\exp ik_x x - ik_y y + \exp ik_x x + ik_y y + E_s(x, y), \quad (2)$$

где первые два слагаемых соответствуют падающей плоской волне и волне, отраженной от невозмущенной плоской поверхности; $E_s(x, y)$ – часть волнового поля, рассеянная на цилиндрической поверхности.

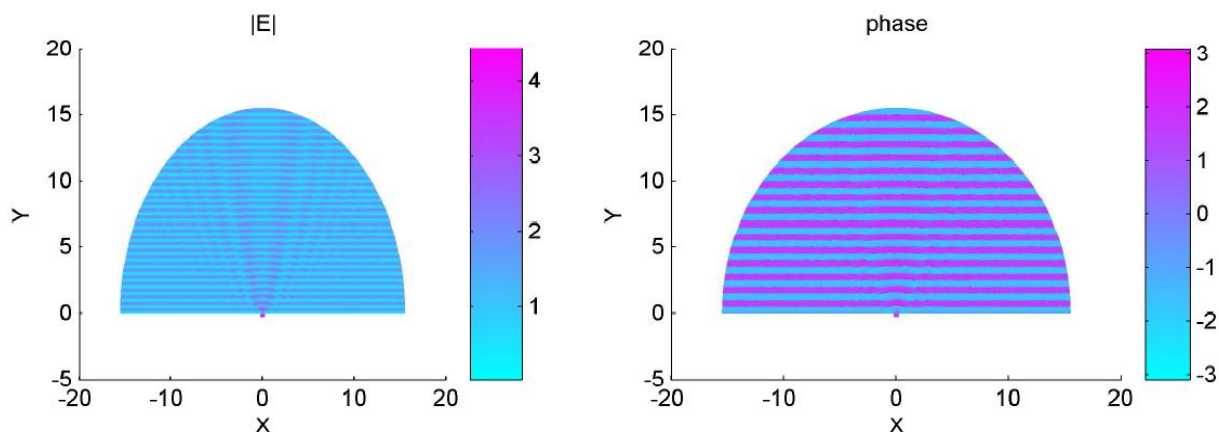


Рисунок 3 - Распределение амплитуды и фазы электромагнитного поля световой волны в области.

После математических преобразований и определения граничных условий поле световой волны, созданной отражающим тест-объектом при освещении под углом θ , может быть выражено следующей формулой:

$$u_{\theta}(x, y) = \exp(ik_x x + ik_y y) + 2i \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)}(kR)} \exp(-in\theta) J_n(kR) - \exp(in\theta) J_n(kR) \sin n\varphi, \quad (3)$$

где θ – угол падения освещения; $k_x = r \cos\theta$; $k_y = r \sin\theta$.

Типичное распределение амплитуды и фазы поля электромагнитной волны в заданной области, полученное численным моделированием, показано на рис. 3. Для идеально проводящих объектов более сложного периодического профиля поверхности, отличного от кругового, например, гребенчатого профиля (рис. 4), решение уравнений электромагнитного поля может быть найдено методом конечных элементов средствами PDE Toolbox MatLab 7.0. Для необходимой точности расчета вблизи участков поверхности

с изломами профиля использовалось дополнительное сгущение сетки конечных элементов. Значения рассеянной компоненты электрического поля E_z программно рассчитывались на плоскостях, отстоящих от плоскости объекта на целое число длин волн (от одной до пяти λ), после чего осуществлялось аналитическое продолжение поля в плоскость фокусировки микроскопа с точностью до неоднородных волн, не регистрируемых в эксперименте.

Априорная информация о симметрии электромагнитного поля позволяет существенно сократить необходимые вычислительные затраты для получения решения.

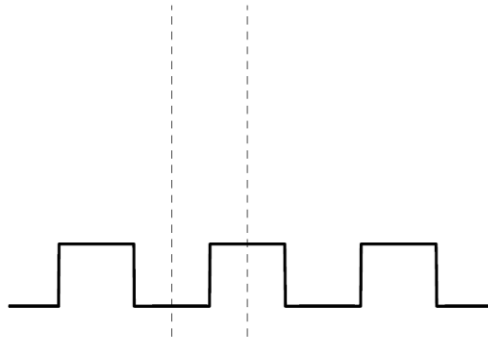


Рисунок 4 - Геометрия симметричного прямоугольного гребенчатого профиля поверхности

Так, при нормальном падении освещения на идеально проводящую поверхность симметрично прямоугольного гребенчатого профиля (рис. 4) можно указать систему периодически расположенных плоскостей симметрии, на которых можно потребовать равенства нулю нормальной производной решения и затем искать решение в области, ограниченной двумя соседними плоскостями симметрии (на рис. 4 показаны вертикальными пунктирными линиями). Типичные распределения амплитуды и фазы отраженной волны над поверхностью гребенки были получены для условий, при которых координаты X , Y нормированы на длину волны $\lambda = 532$ нм. Высота гребенки и длина периода ее профиля равны

соответственно 110 и 3000 нм. Объект освещается нормально падающей плоской волной.

Отраженное от гребенки поле с точностью до неоднородных волн ближнего поля, не наблюдаемых в интерференционном микроскопе с оптической схемой Линника, может быть представлено конечной суммой ряда Фурье по поперечной координате

$$E(x, z) = \sum_{n=-m}^m a_{|n|} \exp\left(ik_x x + i\frac{2\pi n x}{d} + i\sqrt{k^2 - \left(k_x + \frac{2\pi n x}{d}\right)^2} z\right), \quad (4)$$

где $k=2\pi/\lambda$ - волновое число, $k_x=k\sin\theta$ - поперечная компонента волнового вектора падающего освещения;

θ - угол падения освещения;

a_n - парциальные амплитуды поперечных пространственных гармоник отраженного поля.

Были проведены эксперименты на интерферометре АИМ. Целью экспериментов явилось определение зависимости фазы и амплитуды рассеянного поля от плоскости фокусировки модифицированного автоматизированного интерференционного микроскопа АИМ. В качестве объекта была взята калибровочная решетка TGZ22 из комплекта атомно-силового микроскопа NT MDT Solver Pro, имеющая прямоугольный профиль с периодом 3 мкм, высотой 110 нм, выполненная из кремния. Регистрация амплитуды и фазы производилась при разных положениях фокусировки микроскопа с аксиальным шагом 3 мкм при неизменном угле конического пучка зондирующего излучения. Были получены наборы данных (фаза и амплитуда) в зависимости от расфокусировки для ряда различных значений угла конического пучка. Вариация угла осуществлялась за счет изменения раствора апертурной диафрагмы конденсора микроскопа. Точная фокусировка на объект имела место в области средних значений диапазона

измерений. Несмотря на различие в относительных значениях поперечных пространственных гармоник a_n с различными номерами, обусловленного неполным соответствием использованной при расчете модели и реального экспериментального тест-объекта, модельный расчет обеспечивает правильный характер спада амплитуд различных поперечных пространственных гармоник a_n по мере расфокусировки микроскопа, что подтверждает хорошее совпадение результатов модельного расчета с экспериментальными данными.

Таким образом:

- Практически реализован ряд подходов к решению задачи рассеяния оптического излучения на проводящих и диэлектрических структурах нанометрового диапазона, в том числе алгоритмы решения уравнений электромагнитного поля в неоднородной среде методом конечных элементов. Разработано соответствующее программное обеспечение, проведено численное тестирование разработанных алгоритмов.

- Проведены расчеты по численному моделированию экспериментов по оптической микроскопии различных структур нанометрового масштаба. На основе проделанных расчетов проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и реальных экспериментов. При этом установлено, что в общем бюджете неопределенности измерений удельный вес (вклад) источников неопределенности, обусловленных факторами взаимодействия зондирующего оптического излучения с наноструктурами исследуемой поверхности, может составлять от 15% до 30%. Большие значения вклада этих источников неопределенности характерны для измерений параметров высот неровностей поверхности в диапазоне от 0,5 нм до 10 нм. Меньшие значения характерны для измерений в диапазоне свыше 10 нм.

- Исследованы возможности повышения качества изображений наномасштабных структур по данным многокурсовой регистрации изображения оптическими микроскопами. Проанализированы возможности

повышения эффективной разрешающей способности микроскопа ограниченной числовой апертуры за счет когерентного суммирования изображений. **Показана возможность оценки геометрических параметров поверхности наблюдаемых наноструктур по данным оптической микроскопии.**

Поэтому в диссертации было принято решение о сочетании оптического микроскопа с современным лазерным интерферометром и разработке алгоритмов автоматической обработки интерферограмм, позволяющих перейти от амплитудных измерений к более помехоустойчивым и чувствительным методам извлечения из интерферограммы фазовой информации о трехмерных (3D) нанообъектах, т.е. **к методам и средствам интерференционной нанометрии.**

В диссертации показано, что должным образом модернизированный интерференционный микроскоп для отраженного видимого излучения (например, на основе широко распространенного в свое время интерференционного микроскопа акад. В.П.Линника), оснащенный современным программным обеспечением, также позволяет получать фазовую измерительную информацию о параметрах шероховатости отражающей поверхности в нанометровом диапазоне. Поэтому представили интерес методы (алгоритмы) вычисления фазы по интерферограмме и в особенности весьма перспективный **метод фазовых шагов (МФС)**, позволяющий существенно повысить разрешающую способность интерференционного микроскопа.

Поскольку метод наименьших квадратов вычисления фазы можно использовать как для синтеза алгоритмов с фиксированными шагами, так и для построения самокалибрующихся алгоритмов, в которых значения фазовых шагов предварительно вычисляются по интерферограммам, в работе рассмотрен алгоритм вычисления фазы методом наименьших квадратов.

Простейшая модель интерференционного сигнала имеет вид:

$$I(\varphi) = I_0 + I_1 \cos \varphi = I_0 (1 + \gamma \cos \varphi), \quad (5)$$

где γ - контраст (видность) полос. Уравнение (5) содержит три неизвестных: амплитуду I_o , контраст γ и собственно фазу φ , поэтому для вычисления фазы необходимо измерить интенсивность $I_k(\varphi + \delta_k)$ при трех различных фазовых шагах δ_k и решить получившуюся систему трех линейных уравнений:

$$I_k(\varphi + \delta_k) = I_k^{\text{изм}} \quad (6)$$

где $I_k^{\text{изм}}$ - измеренные значения интенсивности света. Преобразуем левую часть уравнений (5) к виду:

$$\begin{aligned} I_k(\varphi + \delta_k) &= I_o(1 + \gamma \cos(\varphi + \delta_k)) = I_o + \gamma I_o \cos\varphi \cos\delta_k - \gamma I_o \sin\varphi \sin\delta_k = \\ &= a_o + a_1 \cos\delta_k + a_2 \sin\delta_k, \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_o = I_o$; $a_1 = \gamma \cos\varphi$; $a_2 = -\gamma \sin\varphi$. Если фазовые шаги δ_k известны, то для нахождения фазы необходимо решить систему линейных уравнений (5) относительно неизвестных a_o, a_1 и a_2 , и вычислить фазу по формуле:

$$\varphi = -\arctg \frac{a_2}{a_1}. \quad (8)$$

Решив систему (6), получим так называемый обобщенный 3-шаговый алгоритм:

$$\varphi = \arctg \frac{\left(\begin{matrix} I_3^{\text{изм}} - I_2^{\text{изм}} \\ I_2^{\text{изм}} - I_3^{\text{изм}} \end{matrix} \right) \cos\delta_1 + \left(\begin{matrix} I_3^{\text{изм}} - I_1^{\text{изм}} \\ I_1^{\text{изм}} - I_3^{\text{изм}} \end{matrix} \right) \cos\delta_2 + \left(\begin{matrix} I_2^{\text{изм}} - I_1^{\text{изм}} \\ I_1^{\text{изм}} - I_2^{\text{изм}} \end{matrix} \right) \cos\delta_3}{\left(\begin{matrix} I_3^{\text{изм}} - I_2^{\text{изм}} \\ I_2^{\text{изм}} - I_3^{\text{изм}} \end{matrix} \right) \sin\delta_1 + \left(\begin{matrix} I_3^{\text{изм}} - I_1^{\text{изм}} \\ I_1^{\text{изм}} - I_3^{\text{изм}} \end{matrix} \right) \sin\delta_2 + \left(\begin{matrix} I_2^{\text{изм}} - I_1^{\text{изм}} \\ I_1^{\text{изм}} - I_2^{\text{изм}} \end{matrix} \right) \sin\delta_3}. \quad (9)$$

Как показывает практика, 3-шаговый алгоритм не позволяет вычислять фазу с высокой точностью. Для повышения точности необходимо увеличивать число фазовых шагов. При количестве шагов $N > 3$ для вычисления фазы можно использовать метод наименьших квадратов, который состоит в поиске значений a_o, a_1 и a_2 , минимизирующих невязку:

$$R(a_o, a_1, a_2) = \sum_{k=1}^N (I(\varphi + \delta_k) - I_k^{\text{изм}})^2 = \sum_{k=1}^N (a_o + a_1 \cos \delta_k + a_2 \sin \delta_k - I_k^{\text{изм}})^2. \quad (10)$$

Чтобы найти минимум невязки, приравняем ее частные производные по a_o , a_1 и a_2 к нулю и решим получившуюся систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \partial R / \partial a_o = 0; \\ \partial R / \partial a_1 = 0; \\ \partial R / \partial a_2 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Из множества алгоритмов с фиксированными шагами, которые можно получить методом наименьших квадратов, следует упомянуть N -шаговый алгоритм квадратурного (синхронного) детектирования:

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k^{\text{изм}} \sin(k\delta)}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k^{\text{изм}} \cos(k\delta)}, \quad (12)$$

где $\delta = 2\pi/N$.

Классификация источников неопределенности вычисления фазы с использованием метода фазовых шагов приведена на рис. 5.

Неопределенность вычисления фазы методом наименьших квадратов будет складываться из случайной и систематической составляющих. Неопределенность типа А обусловлена шумами интенсивности в фотоприемнике, которые обычно имеют закон распределения, близкий к гауссову. Как известно, метод наименьших квадратов наилучшим образом осуществляет аппроксимацию в присутствии гауссова шума. Уменьшить неопределенность типа А, обусловленную влиянием шумов, можно лишь путем увеличения количества шагов (т.е. точек аппроксимации). Неопределенность типа В связана с отклонениями реальной зависимости $I(\varphi)$ от представленной в формуле (5).

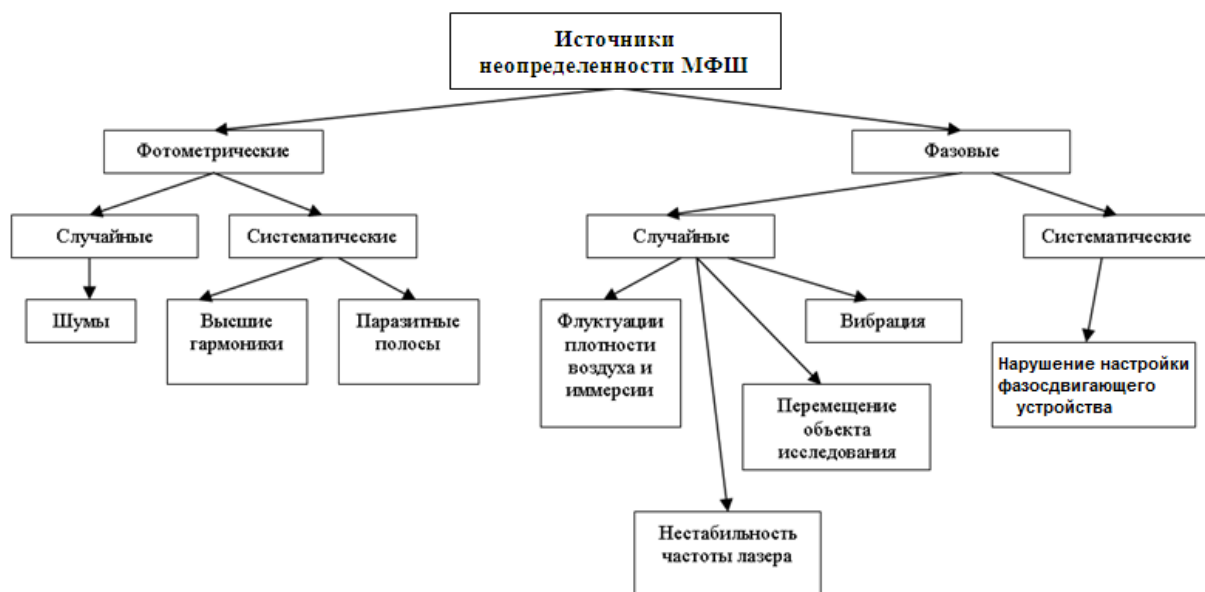


Рисунок 5 - Классификация источников неопределенности вычисления фазы методом фазовых шагов.

Эти отклонения обусловлены наличием высших гармоник и паразитных интерференционных полос, а также нарушением настройки фазосдвигающего устройства.

Все эти три причины учитываются соответствующим подбором аппроксимирующей функции, что нашло отражение в разработанной методике измерений.

В процессе теоретических исследованиях было установлено, что:

1. Метод наименьших квадратов позволяет синтезировать алгоритмы МФШ с произвольными шагами, что может быть использовано при построении самокалибрующихся алгоритмов.

2. При вычислении фазы методом наименьших квадратов неопределенность типа В учитывается в виде высших гармоник и изменения настройки фазосдвигающего устройства.

3. Учет паразитных полос значительно усложняет задачу из-за того, что система уравнений становится нелинейной.

4. Решение системы уравнений для каждой точки изображения делает процесс вычисления фазы более длительным, чем при использовании формул (8) или (11).

Исследования возможностей метода наименьших квадратов применительно к фазовой микроскопии позволили выполнить анализ чувствительности алгоритмов МФШ к влиянию ряда источников неопределенности типа В, проанализировать неопределенность типа А вычисления фазы, обусловленную флуктуациями интенсивности излучения, а также некоторые эффективные алгоритмы с фиксированными шагами. Анализ показывает, что все алгоритмы фазовых шагов, получаемые вышеизложенными способами, могут быть представлены в виде формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum_{k=1}^N b_k I_k^{u3M}}{\sum_{k=1}^N a_k I_k^{u3M}}, \quad (13)$$

где a_k и b_k - коэффициенты, зависящие от значений фазовых шагов δ_k .

Как показывают исследования, значительное влияние на точность вычисления фазы оказывают шумы фотоприемника. Для учета этого влияния представим формулу (13) в виде разложения в ряд Тейлора по значениям интенсивностей I_k^{u3M} до 1-го порядка:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{k=1}^N a_k I_k}{\sum_{k=1}^N b_k I_k} = \varphi_0 + \sum_{n=1}^N A_n \Delta I_n + o(\Delta I_n^2); \quad (14)$$

$$A_n = \frac{\partial \varphi}{\partial I_n} = \frac{1}{I_0} \frac{b_n \sum_{k=1}^N a_k \langle I_k \rangle - a_n \sum_{k=1}^N b_k \langle I_k \rangle}{\left(\sum_{k=1}^N a_k \langle I_k \rangle \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N b_k \langle I_k \rangle \right)^2},$$

где $\langle I_k \rangle = (1 + \gamma \cos(\varphi + \delta_k))$ - значения интенсивностей, нормированные к I_0 .

По формуле для дисперсии линейной комбинации случайных величин получаем:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \sum_{n=1}^N A_n^2 \sigma_I^2 = \sigma_I^2 \sum_{n=1}^N A_n^2 = \sigma_I^2 \left(\frac{\sqrt{\eta(\varphi, \gamma, N)}}{I_0} \right)^2, \quad (15)$$

где $\eta(\varphi, \gamma, N) = \sum_{n=1}^N A_n^2$ - коэффициент ослабления дисперсии шума.

Следует отметить, что он также зависит от ошибки задания постоянных фазовых сдвигов. Функция $\eta(\varphi, \gamma, N)$ зависит от измеряемой фазы φ , контраста полос γ и числа шагов N . Функция η хорошо аппроксимируется зависимостью вида:

$$\eta \sim 1/aN, \quad (16)$$

где a - некоторое действительное число. Для $\gamma = 1$ $a = 0,5$; для $\gamma = 0,7$ $a = 0,25$, а для $\gamma = 0,5$ $a = 0,125$. Из формул (15) и (16) следует, что $\sigma_{\varphi} \sim 1/\sqrt{N}$. Это вполне очевидный результат, показывающий, что увеличение числа шагов в каком-то смысле эквивалентно усреднению.

Отношение σ_I/I_0 можно рассматривать как стандартную неопределенность измерения интенсивности, поэтому формулу (15) можно переписать в виде:

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\eta(\varphi, \gamma, N)} \frac{\sigma_I}{I_0} = \sqrt{\eta(\varphi, \gamma, N)} \delta_I, \quad \sigma_{\varphi} \sim \delta_I, \quad (17)$$

где δ_I - относительная ошибка измерения интенсивности. Переходя в формуле (17) от стандартных отклонений к стандартным неопределенностям, оцениваемым по типу А, можно получить простое правило для оценки случайной ошибки вычисления фазы методом фазовых шагов: неопределенность типа А вычисления фазы прямо пропорциональна стандартной неопределенности измерения интенсивности интерференционной картины.

В завершение теоретического исследования была проведена экспериментальная проверка корректности результатов теоретического исследования точностных характеристик алгоритмов МФШ. Объектом экспериментальной проверки явилось случайное отклонение измерений

фазы, оцениваемое стандартной неопределенностью типа А. Для исследования в работе применена следующая методика:

1) регистрировались двадцать серий из семи интерферограмм с шагом $\pi/2$;

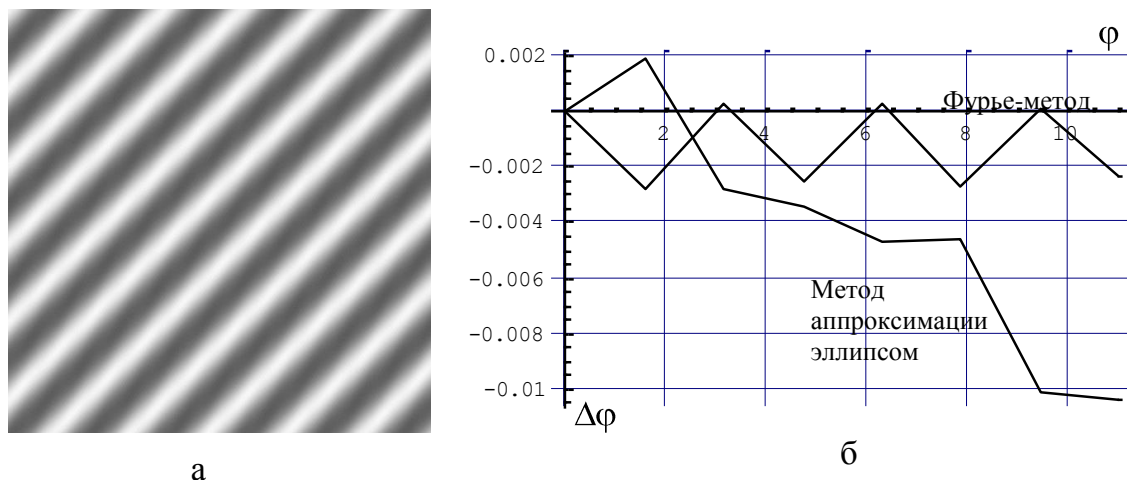


Рисунок 6 – а) модельная интерферограмма; б) зависимость отклонения $\Delta\varphi$ вычисления постоянного сдвига фазы φ .

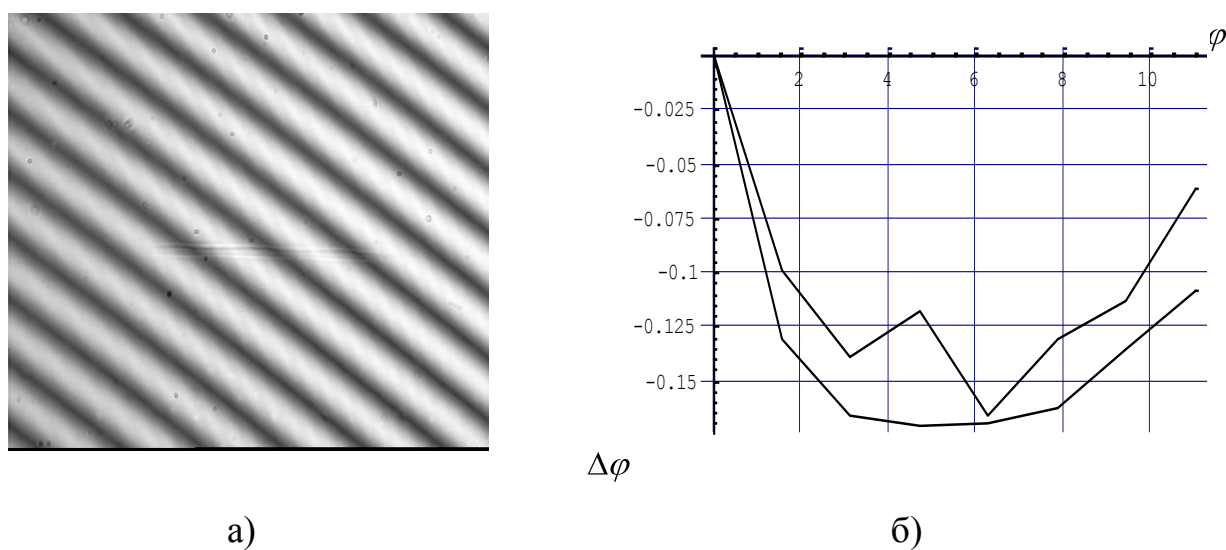


Рисунок 7 – а) реальная интерферограмма; б) зависимость отклонения $\Delta\varphi$ вычисления постоянного сдвига фазы φ .

2) по каждой серии интерферограмм вычислялась фаза;

3) для каждой точки полученного фазового изображения вычислялась дисперсия;

4) из получившейся карты дисперсий выбрасывались anomalously большие значения;

5) вычислялась средняя дисперсия, и находились ее наибольшее и наименьшее значения по всему изображению.

Размер изображения ограничивался до 512x512. За аномальные принимались значения дисперсии, большие 0,5, так как они связаны с грубыми ошибками вычисления фазы. Полученные результаты для различных алгоритмов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты вычислений СКО для различных алгоритмов

Алгоритм	Среднее СКО	Максимальное СКО
3-шаговый алгоритм	0,023795	0,08537
4-шаговый МНК-алгоритм	0,01268	0,061713
5-шаговый МНК-алгоритм	0,0116744	0,0616877
Алгоритм Харихарана-Швайдера (5 шаг.)	0,0116894	0,0615708
7-шаговый улучшенный по Швайдеру	$0,010839 \approx \lambda/1000$	$0,06175 \approx \lambda/200$

Из этих результатов можно сделать выводы о том, что случайная ошибка вычисления фазы, оцениваемая стандартной неопределенностью типа А, зависит от числа шагов и почти не зависит от типа алгоритма. Убывает она с ростом числа шагов довольно медленно (пропорционально $1/\sqrt{N}$).

Таким образом, результаты выполненного во второй главе теоретического исследования и их экспериментальное подтверждение свидетельствуют об обоснованности выбора алгоритма (метода) фазовых шагов для построения реализующей фазовую микроскопию части калибровочного комплекса для средств измерений параметров рельефа и шероховатостей в нанометровом диапазоне.

Третья глава посвящена описанию исследуемых в диссертации калибровочных установок комплекса, предназначенного для обеспечения единства измерений рельефа и шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне. Комплекс должен, во-первых, обеспечивать воспроизведение и хранение значений параметров шероховатости поверхностей в пределах нанометровой шкалы и их передачу подчиненным средствам измерений с помощью аттестованных на его аппаратуре эталонных мер шероховатости, а, во-вторых, позволять использовать входящие в его состав калибровочные установки для выполнения измерений параметров шероховатости образца с целью последующего «внутрилабораторного» сличения получаемых результатов. Удовлетворительные результаты сличения позволяли бы аттестовать такую меру в качестве эталонного средства измерений.

В состав калибровочного комплекса вошли исследованные в диссертации:

- калибровочная установка на базе модернизированного лазерного интерференционного микроскопа с оптической схемой Линника;
- калибровочная установка на базе прецизионного интерференционного профилометра белого света фирмы Zygo модели NewView 6200;
- калибровочная установка на базе мультимодального сканирующего зондового микроскопа Innova фирмы VEECO;
- набор эталонных мер для калибровки установок комплекса.

Калибровочные установки предназначены, в первую очередь, для исследования микротопографических параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне. Поэтому изучение их метрологических характеристик в сочетании с набором эталонных мер явилось основной задачей данной работы.

Модернизированный при выполнении диссертации лазерный интерференционный микроскоп на базе оптической схемы Линника явился основой первой калибровочной установки. В нем реализована

схема инвертированного микроскопа, при этом исследуемый объект располагается на зеркале и излучение дважды проходит через него, что вдвое повышает чувствительность измерения оптической разности хода (ОРХ) по сравнению со схемами «на просвет», когда излучение проходит через объект один раз. Позитивной особенностью этой калибровочной установки является то обстоятельство, что она построена на основе широко распространенного в промышленности средства измерений параметров шероховатости – микроинтерферометра МИИ-4 путем многократного повышения его точности и разрешающей способности за счет автоматизации и модернизации его оптико-электронной и программно-алгоритмической компонент. Это существенно упрощает процесс освоения промышленными предприятиями этого высокоточного средства измерений. При этом сохранены его основные преимущества – бесконтактность и высокая производительность измерений, поскольку сразу происходит реконструкция топограммы участка поверхности вместо последовательного профильного сканирования вдоль базовой линии.

Вторая калибровочная установка, входящая в состав комплекса, построена на базе прецизионного интерференционного профилометра фирмы Zygo модели NewView 6200. Этот прибор реализует принцип бесконтактной 3D - растровой интерферометрии в белом свете и является универсальным (многоцелевым) прибором для трехмерного анализа геометрической структуры поверхности различных объектов, изготовленных из разных материалов: металла, керамики, стекла и т.д. Он создает графические изображения и проводит их цифровой анализ с целью получения высокоточных данных о структуре поверхности исследуемого объекта.

В диссертации с целью повышения точности получаемых объемных изображений (топограмм) с использованием эталона единицы высоты ступеньки фирмы VLSI Standards Inc. проводилась калибровка датчика вертикального смещения (Z-калибровка) и калибровка увеличения

изображающей системы (эффективного увеличения объектива), называемая латеральной калибровкой.

Третья калибровочная установка, входящая в состав комплекса, построена на базе мультимодального сканирующего зондового микроскопа фирмы VEECO. Включение этой калибровочной установки в состав комплекса обусловлено, прежде всего, необходимостью проведения сравнительных испытаний и внутрилабораторных сличений результатов измерений параметров рельефа и шероховатости одних и тех же эталонных мер различными методами лазерной интерферометрии, интерферометрии в «белом свете» и атомно-силовой микроскопии, что должно повысить объективность оценки достоверности результатов измерений.

Целесообразность введения в состав разрабатываемого в диссертации метрологического комплекса мультимодального сканирующего зондового микроскопа фирмы Veeco Innova обусловлена также тем обстоятельством, что наряду с измерением геометрических параметров шероховатости поверхности в нанометровом масштабе может возникнуть необходимость прецизионных измерений многих других физических и физико-химических свойств нанорельефа поверхности, причем именно в одном из режимов атомно-силового зондирования.

Важнейшей составляющей калибровочного комплекса является набор мер, которые могли бы служить рабочими эталонами, позволяющими в первую очередь градуировать вертикальные шкалы интерференционных микроскопов, входящих в комплекс, и при этом обеспечивать сходимость результатов измерений, полученных на разных приборах комплекса.

Тщательный отбор и исследования многих вариантов привели к выбору трех рельефных мер высоты ступеньки: SHS-1, 8QC; SHS-1800 QC и SHS-180 QC. Номинальные значения высоты ступеньки мер составляли соответственно 1,781 мкм; 179,4 нм и 19,9 нм, а расширенные неопределенности приписанных в результате аттестации значений высоты ступеньки оказались равными, соответственно, 0,011 мкм; 2,0 нм и 0,8 нм.

Объектом разработки в рамках диссертационной работы явился также лазерный автоматизированный интерферометр (ЛАИ), предназначенный для измерения относительных высот профиля поверхности полированного изделия по всей его площади (топограммы), в том числе подложек сферических зеркал, диаметр которых не превышает 30 мм, высота не превышает 10 мм, а радиус кривизны лежит в диапазоне от 2000 до 7000 мм. По существу этот прибор представляет собой интерференционный микрорефрактометр и обеспечивает измерения характеристик и параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне. Прототипом разработанного прибора явился усовершенствованный вариант серийно выпускаемого компьютерного интерференционного профилометра ПИК-30.

Достоинством измерительно-калибровочного комплекса с предложенной приборной структурой является возможность сличения результатов измерений шероховатости, полученных двумя (а для фазовых объектов – тремя) различными по принципу измерений техническими средствами и разными методиками, что обеспечивает значительное уменьшение неопределенности типа В и является всегда первоочередной и наиболее сложной задачей при выполнении высокоточных измерений.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований разработанного комплекса. Сравнительные экспериментальные исследования установок, входящих в состав измерительно-калибровочного комплекса, проводились на трех рельефных мерах высоты ступеньки, разработанных фирмой VLSI, сертифицированных NIST и аттестованных на территории РФ в ранге рабочих эталонов. Измерения проводились последовательно на автоматизированном лазерном интерференционном микроскопе, интерферометре белого света NewView 6200 фирмы Zygo и мультимодальном сканирующем зондовом микроскопе Innova фирмы VEECO в режиме туннельной микроскопии. Результаты измерений, полученные на трех различных калибровочных установках,

показывают хорошее совпадение с паспортными данными мер высоты ступеньки, приписанными из NIST.

Кроме того, на интерференционном микроскопе «в белом свете» типа ZYGO NEW VIEW 6200 были проведены исследования параметров специальной меры МШПС-2.0К, заводской номер 009, изготовленной по техническим условиям НИЦПВ 393200.001ТУ. Основная характеристика меры – высота выступов в аттестованной зоне, равная (565 ± 2) нм. Результаты измерений показали хорошее совпадение с паспортными данными меры МШПС-2.0К.

Представлены основные результаты выполненных работ по проведению сличения калибровочных установок метрологических комплексов в области измерений рельефа и шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне в рамках международной метрологической организации КООМЕТ с целью декларирования измерительных и калибровочных возможностей Российской Федерации.

При проведении сличений с РТВ (Германия), в которых участвовал исследованный в диссертации лазерный интерферометр АИМ, был использован набор 3D-наноструктур, состоявший из различных конфигураций трех разных высот. Результаты сличений подтвердили возможность использования принадлежащих каждой стране интерференционных микроскопов в качестве прецизионных средств калибровки в диапазоне высот от ~ 7 до ~ 800 нм.

В этой же главе приведено краткое описание разработанных проектов отечественных стандартов в области интерферометрии высокого разрешения, гармонизированных с требованиями и регламентами ISO/TR 14999-1,2,3. Выпуск этих стандартов в обращение предусмотрен планом национальной стандартизации 2010 года.

Заключение

1. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что при оценке параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне:

- топографические методы при одинаковой информативности и достоверности результатов требуют меньшего количества измерений, чем профильные методы;

- необходимо учитывать рассеяние наноструктурами исследуемой поверхности зондирующего электромагнитного излучения, связанное с явлением дифракции излучения в результате поперечно-электрической ($\mathbf{E}||\mathbf{Oy}$) и поперечно-магнитной ($\mathbf{H}||\mathbf{Oy}$) поляризации оптического излучения, поскольку в общем бюджете неопределенности измерений удельный вес (вклад) источников неопределенности, обусловленных этими факторами, может составлять от 15% до 30%. Большие значения вклада этих источников неопределенности характерны для измерений параметров высот неровностей поверхности в диапазоне от 0,5 нм до 10 нм. Меньшие значения характерны для измерений в диапазоне свыше 10 нм;

- применительно к лазерному автоматизированному интерферометру построены математические модели и выполнено численное моделирование процедуры восстановления рельефа поверхности с учетом рассеяния излучения на изолированных наноразмерных неоднородностях поверхности, а также поверхностях периодического профиля. Результаты моделирования и реальных измерений находятся в хорошем согласии с паспортными данными на аттестованную меру, использованную при экспериментах.

2. При исследовании особенностей алгоритмов обработки интерферограмм, получаемых на лазерном автоматизированном интерферометре методом фазовых шагов, и анализе их чувствительности к влиянию некоторых наиболее значимых источников неопределенности измерений параметров рельефа поверхности установлено, что:

- стандартная неопределенность типа А вычисления фазы, обусловленная флуктуациями интенсивности излучения, зависит от числа шагов и убывает с ростом числа шагов пропорционально $1/\sqrt{N}$;

- неопределенность типа В может быть уменьшена за счет подавления высших гармоник и юстировки фазосдвигающего устройства;

- проведенная модернизация оптико-электронной и программно-алгоритмической компонент лазерного интерферометра на основе использования методов фазовых шагов позволила добиться оценки геометрических параметров рельефа поверхности наблюдаемых наноструктур по данным оптической микроскопии с разрешением до $\lambda/800$.

3. Сформированный состав измерительно-калибровочного комплекса на основе интерферометров высокого разрешения, сканирующего зондового микроскопа и набора мер в ранге рабочих эталонов позволяет проводить внутрилабораторные сличения результатов измерений параметров рельефа и шероховатостей в нанометровом поверхностных диапазоне, полученных с использованием различных физических принципов, что позволяет в значительной степени уменьшить неопределенность по типу В.

4. Проведены экспериментальные исследования комплекса с помощью тщательно отобранных мер высоты ступеньки SHS-1,8QC, SHS-1800QC, SHS-180QC, подтвердившие, с одной стороны, готовность комплекса к реализации возложенных на него функций, а с другой – высокую точность трех исследованных мер высоты ступеньки, позволившую аттестовать их в качестве рабочих эталонов единицы длины в диапазоне от ~ 7 до ~ 800 нм, в свою очередь обеспечивших градуировку линейных вертикальных шкал в наноразмерном диапазоне.

5. Результаты сличений российских и немецких (РТВ) калибровочных возможностей на базе тест-объектов в виде 3D-наноструктур, состоявших из различных конфигураций трех разных высот, подтвердили возможность использования принадлежащих каждой стране

интерференционных микроскопов в качестве исходных средств калибровки в диапазоне высот от ~ 7 до ~ 800 нм.

6. Результаты исследований и разработанные методические рекомендации были использованы при выполнении проекта по созданию современного метрологического комплекса и гармонизированной с требованиями международных стандартов нормативно-методической базы для измерений геометрических параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне. Проект выполняется в рамках реализации мероприятия 3.1 Методической составляющей Федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008-2010гг» и предусматривает создание и ввод в эксплуатацию измерительно – калибровачного комплекса для параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне, а также комплекса отечественных стандартов в области интерферометрии высокого разрешения, гармонизированных с международными требованиями (ISO/TR 14999-1,2,3).

Таким образом, в диссертационной работе содержится решение задачи, имеющей существенное значение для разработки системы метрологического обеспечения геометрических параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения применительно к производству прецизионных деталей в наукоемких высокотехнологичных отраслях промышленности, реального сектора экономики и обороны страны.

Основные материалы диссертации приведены в следующих публикациях:

1. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Золотаревский С.Ю. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы //Приборы, №3 (93) 2008, стр. 1-11.

2. Золотаревский С.Ю. Опыт NIST по изучению измерительных потребностей современных инновационных технологий //Законодательная и прикладная метрология, №6 2007, стр. 5-7.

3. Вишняков Г.Н., Золотаревский С.Ю., Ломакин А.Г., Левин Г.Г. Методы автоматизации обработки интерферограмм фазовых объектов //Метрология, №4 2008, стр. 15-25.

4. Левин Г.Г., Золотаревский С.Ю. Количественная фазовая микроскопия на основе принципов интерференционной рефрактометрии // Метрология, №3 2008, стр. 15-21.

5. Золотаревский С.Ю. Интерферометрия формы поверхностей оптических элементов //XVII Конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2008, стр. 86-87.

6. Золотаревский С.Ю. Интерференционная рефрактометрия параметров и характеристик процессов в жидких конденсированных средах //XVII Конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2008, стр. 75-77.

7. Золотаревский С.Ю. Использование современных средств микроскопии сверхвысокого разрешения для обеспечения прослеживаемости результатов измерений наншероховатостей поверхностей //XVIII Конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2009, стр. 199-202.

8. Золотаревский С.Ю. Обеспечение единства измерений линейных размеров и форм поверхностей в нанометровом диапазоне с использованием калиброванных наноструктур //Международная научно-практическая конференция Метрология-2009 СООМЕТ, Беларусь, г. Минск, 2009, стр. 117-119.

9. Lyssenko, V., Kononogov, S., Zolotarevskiy, S. Comparison of different methods for 3D measurements of surface roughness etalons., International journal «Avanced Engineering» 3(2009) No.1, ISSN 1846-5900.

10. Левин Г.Г., Илюшин Я.А., Кононогов С.А., Золотаревский С.Ю., Лысенко В.Г. Особенности взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с наноразмерными объектами при формировании интерферограмм // Законодательная и прикладная метрология, №1, 2010г, стр. 23-26.

11. Левин Г.Г., Илюшин Я.А., Кононогов С.А., Золотаревский С.Ю. Моделирование процессов рассеяния оптического излучения наноразмерными структурами // Метрология, №12, 2009г, стр. 7-14.

12. Левин Г.Г., Илюшин Я.А., Золотаревский С.Ю., Кононогов С.А., Лысенко В.Г. Моделирование процессов рассеяния оптического излучения нанообъектами с конечными диэлектрической проницаемостью и проводимостью // Метрология, №1, 2010г, стр. 10-22.