

Золотаревский Сергей Юрьевич

**Обеспечение единства измерений геометрических
параметров шероховатости поверхностей в
нанометровом диапазоне методами интерферометрии
высокого разрешения**

05.11.15- метрология и метрологическое обеспечение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва, 2015г.

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

Официальные оппоненты:

- Панкина Галина Владимировна, доктор технических наук, профессор, ректор Академии стандартизации, метрологии и сертификации.
- Хромой Борис Петрович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях Московского технического университета связи и информатики.
- Либерман Анатолий Абрамович, доктор технических наук, начальник лаборатории метрологии лазерного излучения Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

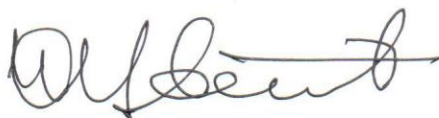
Защита состоится «___» _____ 2015 г. на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Ю.Б. Цветков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Шероховатость поверхности играет важную роль в обеспечении качества промышленных изделий, достижении их заданных эксплуатационных и функциональных показателей. От параметров шероховатости поверхности изделий существенно зависят износостойкость подвижных соединений скольжения и качения, сила трения, герметичность соединений, свойства тонких пленок и медицинских имплантатов, сопротивление обтеканию жидкостями и газами, точность измерительных приборов, коррозионные свойства и внешний вид изделий. Шероховатость поверхности имеет большое значение при изготовлении деталей оптики (зеркал, линз, призм, дифракционных решеток) и оптоэлектроники (фотоприемных элементов солнечных батарей, у которых от характера рельефа зависит поглощательная способность из-за дифракции и рассеяния излучения на неровностях поверхности). При реализации большинства инновационных технологических процессов формирования изделий с заданными свойствами возникают измерительные задачи, связанные с количественной и качественной оценкой геометрических параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне. Сегодня в реальном секторе экономики задействованы десятки тысяч средств измерений параметров шероховатости, которыми оснащены ведущие высокотехнологичные отрасли промышленности. Всего в Государственном реестре средств измерений (СИ) на 31.12.2014г. зарегистрировано свыше 70 типов СИ шероховатости, допущенных к применению на территории Российской Федерации. Парк рабочих средств измерений интенсивно развивается в сторону расширения диапазона измерений, повышения точности, степени автоматизации и производительности, что в значительной мере обусловлено активизацией работ в сфере нанотехнологий и микросистемной техники. Вместе с тем, к 2007 году сложилось такое положение, при котором существовавшая в стране система обеспечения единства измерений параметров шероховатости перестала удовлетворять возрастающим требованиям современного производства и инновационных технологий. Сдерживающим фактором было то обстоятельство, что государственная поверочная схема в этом виде измерений не пересматривалась более двадцати лет. Единство измерений шероховатости было обеспечено эталонной базой в диапазоне от 0,1 мкм до 1600 мкм, в то время как современные высокоточные производства требуют расширения диапазона измерений от 0,001 мкм до 3000 мкм. Элементная база

Государственного эталона в области измерений параметров шероховатости морально и физически устарела, как по метрологическим характеристикам, так и по уровню автоматизации.

Все приведенные выше факторы требовали комплексного решения вопросов метрологического обеспечения в области измерений параметров шероховатости на новом уровне в части точности, диапазона измерений и уровня автоматизации. Поэтому задача совершенствования эталонной базы России, являющейся основой системы обеспечения единства измерений параметров шероховатости, представляется весьма **актуальной**.

Сложность обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне обусловлена 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. При этом, наряду с современными сканирующими зондовыми микроскопами, работающими в контактном и бесконтактном режимах, получают распространение более производительные и перспективные бесконтактные методы профилометрии, базирующиеся на принципах оптической интерференционной микроскопии высокого разрешения.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка научных основ обеспечения единства и достоверности бесконтактных измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне на основе методов и средств интерферометрии высокого разрешения.

Объектом и предметной областью исследования являются методы и средства метрологического обеспечения прецизионных бесконтактных измерений параметров шероховатости поверхностей деталей точного машиностроения, а также изделий оптоэлектронного приборостроения.

Научная проблема, решаемая в работе – создание научно-методической базы (платформы) обеспечения единства и достоверности бесконтактных измерений параметров шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне

Направления исследований. Для достижения поставленной цели необходимо провести исследования по следующим направлениям:

- анализ методологии характеристики топографии поверхности и обработки результатов измерений, выявление статистических закономерностей взаимодействия

факторов, влияющих на формирование неопределенности измерений параметров шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне применительно к различным схемам интерференционной микроскопии высокого разрешения;

- разработка методических принципов обеспечения оптического сверхразрешения за счет моделирования и учета особенностей процессов рассеяния зондирующего электромагнитного излучения при взаимодействии с наноструктурами исследуемой поверхности, а также адаптации алгоритмов вычислительной коррекции с использованием метода фазовых шагов;

- создание методологии оценки и моделирования закономерностей взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с исследуемой поверхностью с учетом его дифракции на проводящих и диэлектрических наноразмерных структурах в результате поперечно-электрической и поперечно-магнитной поляризаций;

- выявление путей уменьшения или компенсации влияния источников неопределенности вычисления фазы с использованием метода фазовых шагов;

- создание прецизионного комплекса калибровочных установок на базе автоматизированного лазерного интерференционного микропрофилометра с разрешением до $\lambda/1000$, интерференционного профилометра «белого света» с вертикальным сканированием, а также набора эталонных мер для передачи единицы рабочим средствам измерений;

- создание нормативно-методической базы оптической интерферометрии высокого разрешения в области измерений параметров шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне и гармонизация её с требованиями международных метрологических организаций.

Методы и средства исследований. Исследования осуществлялись: методами математической статистики и теории вероятностей при исследовании факторов, влияющих на формирование бюджета неопределенности измерений параметров шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне; 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 с использованием метода фазовых шагов при обработке измерительной информации.

Экспериментальные исследования эталонных мер и тест-объектов нанорельефа поверхности выполнялись методами интерференционной микроскопии, в том числе

вертикально сканирующей интерферометрии «белого света», а также сканирующей зондовой (преимущественно атомно-силовой) и электронной микроскопии.

Научная новизна. Научная новизна применительно к измерению параметров шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне методами интерференционной микроскопии заключается в следующем:

- разработана и реализована общая методология обеспечения единства и достоверности измерений параметров шероховатости поверхности, выявлены и исследованы закономерности влияния основных факторов на формирование неопределенности измерений, разработаны рекомендации по уменьшению или компенсации этого влияния;

- разработаны и технически реализованы методические принципы обеспечения оптического сверхразрешения, позволяющие при точной регистрации фазовых изображений существенно превзойти теоретический (рэлеевский) предел разрешения. Показано, что разрешающая способность определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью измерения выходного сигнала, что возможно при интерференционном измерении фазовых изображений;

- разработан общий методический подход к оценке закономерностей взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с исследуемой наноструктурной поверхностью, предложены математические модели и методология реконструкции изображения рельефа исследуемой поверхности с учетом рассеяния зондирующего излучения, обусловленного эффектом дифракции в результате поперечно-электрической и поперечно-магнитной поляризаций;

- предложена и технически реализована научно обоснованная концепция модернизации Государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров шероховатости ГЭТ 113;

- разработана и гармонизирована с требованиями международных метрологических организаций нормативно-методическая база оптической интерферометрии высокого разрешения.

Практическая значимость. Практически реализованы мероприятия по совершенствованию системы обеспечения единства бесконтактных измерений параметров шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне за счет:

1. Создания и ввода в эксплуатацию измерительно-калибровочного комплекса, в соответствии с двумя проектами: «Создание метрологического комплекса и

нормативно-методической базы для обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне» и «Создание методов и средств метрологического обеспечения параметров рельефа большепольных поверхностей в нанометровом диапазоне», выполненных в рамках реализации федеральной целевой программы (ФЦП) «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации в 2008-2011гг». Результаты проектов получили положительную оценку межведомственной приемочной комиссии.

2. Модернизации и внедрения усовершенствованного государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров шероховатости ГЭТ 113, в результате чего удалось расширить диапазон измерений параметров шероховатости поверхности с 0,1 – 1600 мкм до 0,001 – 3000 мкм с одновременным повышением в 2 раза точности воспроизведения единицы длины. Работа выполнена в рамках реализации ведомственной программы Росстандарта по развитию и совершенствованию эталонной базы России.

3. Разработки и исследования эталонных мер для передачи единицы длины в области измерений параметров шероховатости в диапазоне от 1 нм до 1000 нм, в результате чего:

- определен перечень подлежащих поверке и калибровке метрологических характеристик приборов для измерений параметров шероховатости в диапазоне от 1 нм до 1000 нм;
- сформирован и аттестован комплект эталонных мер, включающий меры рельефные высоты ступеньки SHS-1.8QS, SHS-180QS и SHS-1800QS, а также меры типов TGG, TGZ и TGX, которые обеспечивают поверку и калибровку метрологических характеристик приборов для измерений параметров шероховатости поверхности. Разработанные и изготовленные меры решают задачу передачи с требуемой точностью единицы длины в области измерений параметров шероховатости в диапазоне от 1 нм до 1000 нм от Государственного первичного специального эталона к рабочим средствам измерений.

4. Разработки и внедрения усовершенствованной государственной поверочной схемы средств измерений параметров шероховатости в диапазоне 0,001÷3000 мкм, что позволит в ближайшие годы полностью обеспечить измерительно-калибровочные потребности предприятий реального сектора экономики. Внедрение усовершенствованной государственной поверочной схемы практически обеспечено необходимым составом аттестованных вторичных и рабочих эталонов.

5. Разработки и реализации нормативно-методической базы оптической интерферометрии высокого разрешения, введенной в действие в виде одного межгосударственного стандарта на усовершенствованную поверочную схему и трех российских стандартов, включая:

- ГОСТ Р 8.743—2011/ISO/TR 14999-1:2005 Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 1. Термины, определения и основные соотношения;
- ГОСТ Р 8.745—2011/ISO/TR 14999-2:2005 Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 2. Измерения и методика оценки результатов;
- ГОСТ Р 8.744—2011/ISO/TR 14999-3:2005 Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 3. Калибровка и аттестация интерферометров. Методика измерений оптических волновых фронтов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Наибольшее различие между профильными и ареальными методами характеристики поверхности заключено в используемых методах фильтрации. Ареальный гауссовый фильтр, позволяет при измерениях поверхности устойчиво разделять шероховатость и волнистость. При этом предпочтительней использовать только те ареальные параметры, которые имеют прямой профильный эквивалент для сравнения (например, Rq и Sq).

2. При интерференционной микроскопии параметров рельефа и текстуры поверхностей в нанометровом диапазоне методы оптического свехразрешения, позволяющие при высокоточной регистрации фазовых изображений существенно превзойти дифракционный предел (теоретический рэлеевский предел разрешения), могут быть успешно реализованы при условии:

- учета процессов рассеяния зондирующего излучения при взаимодействии с наноструктурированной поверхностью из-за дифракции и эффектов, связанных с поляризацией излучения;

- использования при получении интерферограмм специальных алгоритмов обработки измерительной информации с элементами вычислительной коррекции.

3. При использовании алгоритмов на основе метода фазовых шагов:

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

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

- модернизация оптико-электронной и программно-алгоритмической компонент лазерного интерферометра на основе использования методов фазовых шагов позволяет добиться оценки параметров шероховатости поверхности с разрешением до $\lambda/1000$.

4. Дифракция зондирующего оптического излучения, возникающая в результате его поляризации при взаимодействии с наноструктурами исследуемой поверхности, может быть учтена моделированием с использованием решений векторных уравнений электромагнитного поля и применением метода конечных элементов при решении задач рассеяния излучения на профиле рельефа исследуемой поверхности. Для малых значений высоты профиля (меньше 10нм) удельный вес (вклад) эффекта рассеяния зондирующего излучения может составлять от 15% до 30% от неопределенности, обусловленной собственными шумами лазерного интерференционного микроскопа.

5. Формирование состава измерительно-калибровочного комплекса на основе двух типов интерферометров высокого разрешения и сканирующего зондового микроскопа, работающих на разных физических принципах, позволяет учесть методическую погрешность и в значительной степени уменьшить неопределенность по типу В.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- XVII, XVIII и XIX Всероссийских научно-технических конференциях «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ФГУП «ВНИИОФИ», (Москва, 2008, 2009 и 2013 г.г.);

- Первой Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в нанотехнологиях», Росстандарт, ФГУП «ВНИИОФИ», (Москва, 2014г);

- Международной научно-практической конференции Метрология-2009 СООМЕТ, Беларусь, (г. Минск, 2009г).

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликованы 43 печатные работы, в том числе 24 статьи в рецензируемых журналах,

рекомендованных ВАК РФ (общим объемом 7,7 п.л.).

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и одного приложения. Диссертация содержит 354 страницы машинописного текста, 88 рисунков, 30 таблиц, список литературы из 220 наименований. Приложение содержит 27 страниц.

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 интерферометрии высокого разрешения (порядка $\lambda/1000$).

В первой главе, посвященной рассмотрению особенностей описания объекта измерения, проведен аналитический обзор методов и параметров, используемых для характеристики рельефа и шероховатости исследуемых поверхностей. Проанализирован российский и международный опыт нормирования шероховатости поверхности, регламентированный российскими и международными стандартами (ГОСТ 2789, ISO4287 и ISO25178), а также отмечена тенденция постепенного перехода от профильных измерений вдоль линии к ареальным (зонным), которые благодаря своим преимуществам находят все более широкое применение (у нас в стране и особенно за рубежом) при разработке программно-аппаратных комплексов современных измерительных приборов. Рассмотрены параметры характеристики, а также отличительные особенности методов фильтрации при профильном и ареальном способах характеристики поверхностей, позволяющих разделять шероховатость, волнистость и форму поверхности. Отмечено, что для минимизации различий между этими двумя методами характеристики следует:

- ориентацию прямоугольной части поверхности, подлежащей измерению, производить по направлению укладки (обработки) поверхности;
- использовать ареальный гауссов фильтр при рекомендуемых в ISO/DIS25178 согласованных значениях;
- использовать другие согласованные в профильных стандартах значения параметров (например, радиус наконечника щупа, выборочный интервал и т.д.);

- длина в направлении движения зонда над прямоугольной частью поверхности должна в пять раз превышать длину волны отсечки.

Следует отметить, что предпочтительней использовать те ареальные параметры, которые имеют прямой профильный эквивалент для сравнения (например, R_q и S_q).

В этой главе также рассмотрены области рационального применения фрактальных методов, которые доказали широкие возможности анализа профилей, измеренных на различных поверхностях, а также полезность их использования при построении функциональных моделей взаимодействий с поверхностями. При этом для адекватной оценки шероховатости поверхности целесообразно использовать параметры: фрактальной размерности D_0 ; степени однородности структуры; степени скрытой периодичности и меры упорядоченности. Фрактальные профили и поверхности обычно имеют следующие особенности:

- они непрерывны, но нигде недифференцируемы;
- они не образуют плавных кривых, но скорее могут быть описаны как неровные (зазубренные) или нерегулярные;
- они обладают признаками, повторяющимися в разных масштабах;
- они обладают признаками, повторяющимися таким образом, что они самоподобны по размеру во всех диапазонах.

В некоторых случаях, представляющих практический интерес, геометрические характеристики и параметры профилей и поверхностей легче описываются методами фрактальной геометрии, чем эвклидовой.

Использование фрактальных методов в большей степени характерно для американских производителей современных средств измерений параметров рельефа и текстуры поверхностей, что нашло отражение в их национальных стандартах.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные со спецификой измерительных задач при исследовании рельефа и шероховатости, когда реальная измеряемая поверхность существенно отличается от идеальной «атомарно-чистой» поверхности. Приведено описание основных физических эффектов в нанометровом диапазоне размеров, влияющих на формирование неопределенности измерений параметров рельефа поверхности.

Применительно к различным оптическим схемам интерферометров проведены анализ и исследования факторов, влияющих на формирование бюджета

неопределенности измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности. Это позволило установить, что:

- бюджет неопределенности измерений искривления интерференционной полосы складывается из следующих составляющих: неопределенности измерительного устройства $\Delta a_{\text{и}}$; неопределенности наведения на интерференционную полосу и отсчета $\Delta a_{\text{н}}$; неопределенности, связанной с дополнительными искривлениями интерференционных полос и смещением их в поле зрения из-за температурных изменений $\Delta a_{\text{т}}$; неопределенностей, связанных с дополнительными искривлениями интерференционных полос, вызванных особенностями схемы интерферометра, неточностями юстировки и неопределенностями элементов прибора. Последние неопределенности включают: неопределенность, вызванную отклонением от плоскостности эталонной меры интерферометра Δa_0 и неопределенностью аттестации рабочей плоскости меры $\Delta a_{0\alpha}$; неопределенность, связанную с наличием дисторсии наблюдательной системы интерферометра, $\Delta a_{\text{д}}$; неопределенность, связанную с наличием абберации коллиматорного объектива интерферометра, Δa_{α} ; неопределенность, связанную с расфокусировкой коллиматорного объектива, Δa_{ϕ} ; неопределенность, вызванную неперпендикулярностью рабочей поверхности меры оптической оси коллиматора, $\Delta a_{\text{н}}$;

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

Анализ составляющих бюджета неопределенности измерений показал, что доминирующий вклад вносят группа факторов, связанных с отклонением от плоскостности эталонной меры интерферометра и неточностью её фокусировки относительно оси коллиматора.

Результаты проведенных исследований позволили выбрать направления работ по снижению влияния выявленных факторов на точность измерений.

Подробно рассмотрены методы сверхразрешения в оптической интерференционной микроскопии, при которых достигается получение изображений с разрешением деталей меньше дифракционного предела. Исследования показали, что при высокоточной регистрации фазовых изображений теоретический (рэлеевский) предел разрешения может быть превзойден. Было показано, что разрешающая способность определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью

измерений выходного сигнала. Предварительные оценки показывают, что при измерениях изображения с точностью $0,1 \div 0,2 \%$ и $8 \div 10$ отсчетов регистратора на элемент разрешения возможно достижение сверхразрешения в микроскопии, при котором может быть достигнута точность измерения фазы на уровне одной тысячной длины волны. При этом реализация методов оптического сверхразрешения требует с одной стороны учета эффекта рассеяния зондирующего оптического излучения при его взаимодействии с материалом исследуемой поверхности, с другой стороны разработки и применения специальных алгоритмов автоматизированной обработки интерферограмм с элементами вычислительной коррекции, а также процедур и критериев оценки измерительной информации о параметрах объекта.

В связи с этим третья глава посвящена решению следующих задач исследования:

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

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

Одним из важнейших физических факторов, оказывающих влияние на формирование неопределенности результатов измерений параметров рельефа в диапазоне менее 10 нм, является рассеяние наноструктурами зондирующего электромагнитного излучения оптического диапазона. Это обусловлено явлением дифракции зондирующего электромагнитного излучения при взаимодействии с исследуемыми наноструктурами в результате поперечно-электрической ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{Oy}$) и поперечно-магнитной ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oy}$) 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

(Рисунок 1) 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.

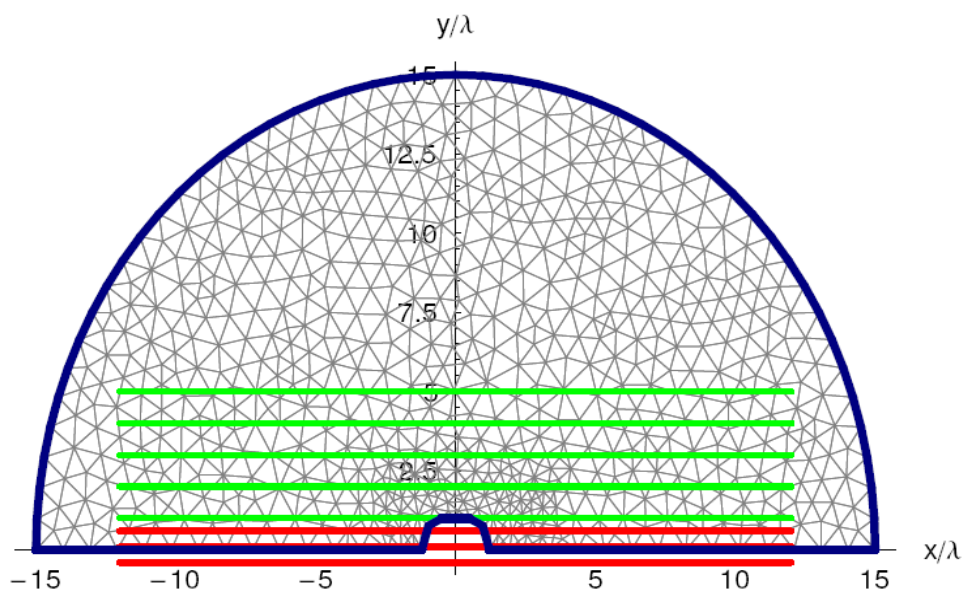


Рисунок 1 - Геометрия задачи рассеяния световых волн на неоднородной поверхности.

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. 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.

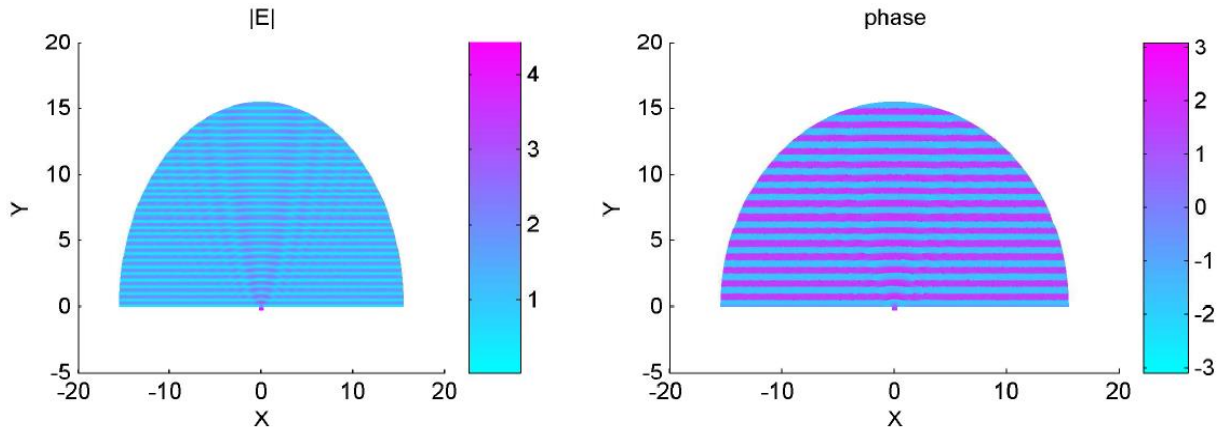


Рисунок 2 - Распределение амплитуды и фазы электромагнитного поля световой волны.

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

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

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 Рисунке 2. Для идеально проводящих объектов более сложного периодического профиля поверхности, например, гребенчатого профиля 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.

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 оптическом микроскопе, может быть представлено конечной суммой ряда Фурье по поперечной координате

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

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 МИА. Целью экспериментов явилось определение зависимости фазы и амплитуды рассеянного поля от плоскости фокусировки модифицированного автоматизированного интерференционного микроскопа МИА. В качестве объекта была взята калибровочная решетка TGZ22, 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. Модельный расчет обеспечил 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 проведенных расчетов и сравнительного анализа установлено, что для значений высоты профиля рельефа, много меньше 10нм, удельный вес (вклад) источников неопределенности, обусловленных факторами взаимодействия зондирующего оптического излучения с наноструктурами исследуемой поверхности, может составлять от 15% до 30% значения неопределенности, обусловленного собственными шумами интерферометра.

В процессе выполнения этой работы было принято решение о выборе оптической схемы лазерного интерференционного микроскопа 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. Было показано, что должным образом модернизированный интерференционный микроскоп, оснащенный современным программным обеспечением, позволяет получать фазовую измерительную информацию о параметрах шероховатости отражающей поверхности в нанометровом диапазоне. Особый интерес представили алгоритмы вычисления фазы на основе перспективного метода фазовых шагов (МФС), позволяющего существенно повысить разрешающую способность интерференционного микроскопа. В работе рассмотрен алгоритм вычисления фазы методом наименьших квадратов, поскольку этот метод 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.

Простейшая модель интерференционного сигнала имеет вид:

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

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:

$$\{I_k(\varphi + \delta_k) = I_k^{\text{изм}}\}_3, \quad (6)$$

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:

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

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:

$$\varphi = \arctg \frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k^{u3M} \sin(k\delta)}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k^{u3M} \cos(k\delta)}, \quad (12)$$

где $\delta = 2\pi / N$.

Классификация источников неопределенности вычисления фазы с использованием метода фазовых шагов приведена на Рисунке 3.

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 позволяет наилучшим образом осуществить 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).

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 исследований 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 по типу В обусловлена наличием высших гармоник и паразитных интерференционных полос, а также изменениями 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 (12).

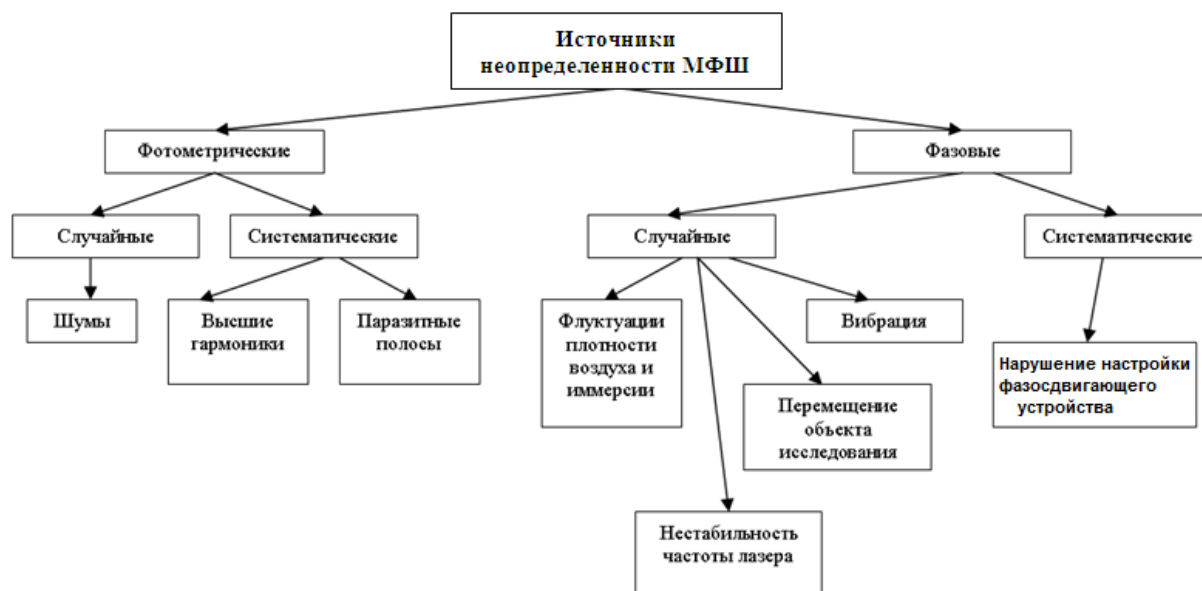


Рисунок 3 - Классификация источников неопределенности вычисления фазы методом фазовых шагов.

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 провести исследования некоторых эффективных алгоритмы с фиксированными шагами. Анализ показывает, что все алгоритмы фазовых шагов, получаемые вышеизложенными способами, могут быть представлены в виде формулы:

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

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 $I_k^{изм}$ до 1-го порядка:

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

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

(14)

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 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 $\pi/2$;

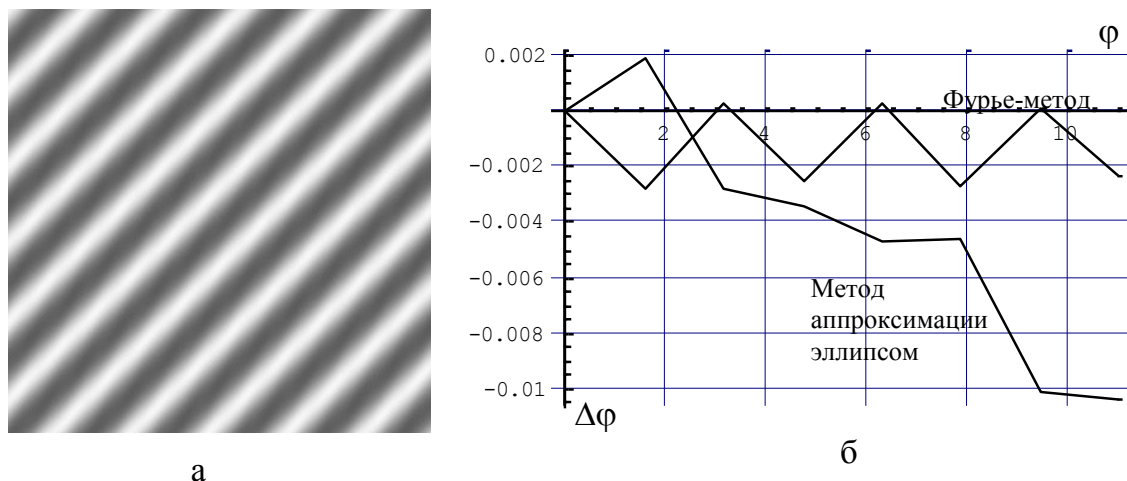


Рисунок 4 – а) модельная интерферограмма; б) зависимость отклонения $\Delta\varphi$ вычисления постоянного сдвига фазы φ .

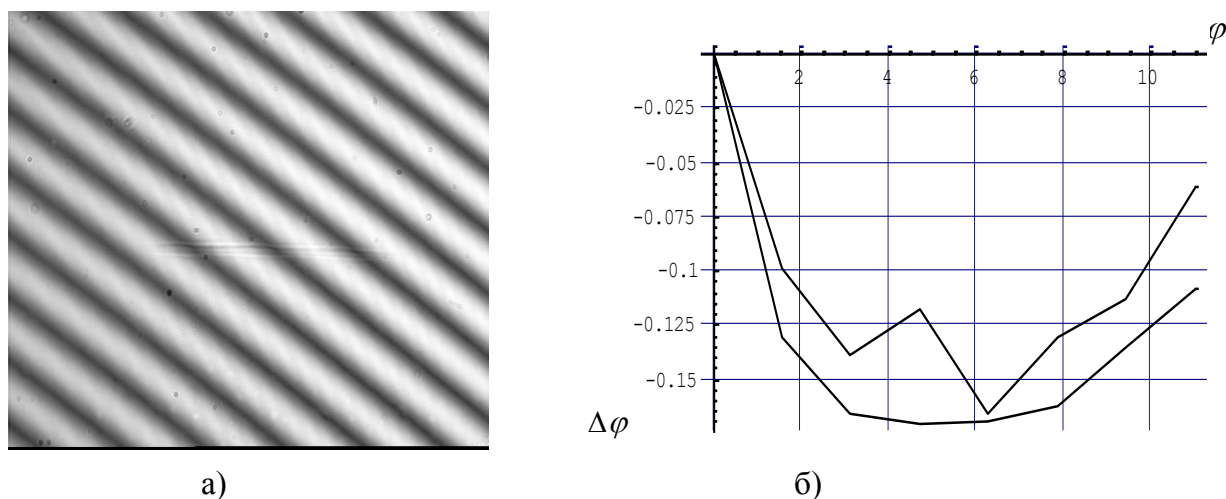


Рисунок 5 – а) реальная интерферограмма; б) зависимость отклонения $\Delta\varphi$ вычисления постоянного сдвига фазы φ .

- 2) по каждой серии интерферограмм вычислялась фаза;
- 3) для каждой точки полученного фазового изображения вычислялась дисперсия;

4) из получившейся карты дисперсий выбрасывались аномально 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 Таблице 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 A, 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 в третьей 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.

Полученные результаты исследований и разработанные на их основе рекомендации по повышению разрешающей способности и точности измерений составили научно-методическую базу для формирования и исследования метрологических характеристик прецизионного измерительно-калибровочного комплекса, являющегося элементной базой инструментальной и методической компоненты совершенствования системы обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке составных частей прецизионного измерительно-калибровочного комплекса, включающего в себя измерительные установки, работающие на разных физических принципах: лазерный интерференционный микроскоп, интерферометр «белого света», мультимодальный сканирующий зондовый микроскоп, обеспечивающий измерения параметров рельефа в режиме атомно-силовой и тоннельной микроскопии, а также набор мер для их калибровки и передачи единицы длины рабочим средствам измерений параметров шероховатости поверхности. Применительно к каждой установке комплекса были проведены исследования метрологических характеристик, разработаны и аттестованы методики измерений. Для калибровки установок комплекса разработан, исследован и прошел испытания набор из трех мер высоты ступеньки типа SHS1,8 QC; SHS180 QC и SHS1800 QC, которые по результатам испытаний были аттестованы и включены в государственный реестр в качестве вторичных эталонов. Все измерительные установки комплекса успешно прошли испытания с целью утверждения типа и включены в Государственный реестр средств измерений. Весь объем исследований и разработок, связанный с созданием измерительно-калибровочного комплекса, был проведен в соответствии с двумя проектами: «Создание метрологического комплекса и нормативно-методической базы для обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне» и «Создание методов и средств метрологического обеспечения параметров рельефа большепольных поверхностей в нанометровом диапазоне», выполненных в рамках реализации федеральной целевой программы (ФЦП) «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации в 2008-2011 гг.». Результаты проектов приняты и получили положительную оценку межведомственной комиссии.

В пятой главе диссертации приведены результаты анализа состояния системы обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне и рассмотрены направления её совершенствования за счет модернизации Государственного первичного специального эталона (ГПСЭ) и внедрения усовершенствованной Государственной поверочной схемы в этом виде измерений. Модернизация ГПСЭ была осуществлена за счет обновления его элементной базы с учетом описанного в предыдущей главе позитивного опыта создания и исследования долговременной стабильности метрологических характеристик прецизионного измерительно-калибровочного комплекса, повышения уровня автоматизации и использования методов сверхразрешения в оптической интерференционной микроскопии. Эффективным оказалось включение в состав

ГПСЭ усовершенствованной эталонной установки на основе оптической интерферометрии высокого разрешения в составе модернизированного лазерного интерферометра, а также эталонной установки на основе сканирующего зондового микроскопа, укомплектованного трехкоординатным лазерным гетеродинным интерферометром. Это позволило достичь расширения диапазона воспроизведения единицы длины в области измерений параметров шероховатости и перейти от существовавшего ранее диапазона от 0,1 мкм до 1600 мкм к диапазону от 0,001 мкм до 3000 мкм. При этом было достигнуто расширение номенклатуры измеряемых параметров, повышение в среднем в 2 раза точности воспроизведения и передачи единицы длины в области измерений параметров шероховатости за счёт компенсации систематических погрешностей и улучшения условий измерений. Включение в усовершенствованную государственную поверочную схему в качестве вторичного эталона прецизионного интерферометра с вертикальным сканированием для бесконтактной профилометрии рельефа поверхности в нанометровом диапазоне позволило метрологически обеспечить измерительные возможности интерферометров «белого света», находящихся в обращении в реальном секторе экономики. Усовершенствованная государственная поверочная схема для средств измерений параметров шероховатости поверхности во главе с модернизированным ГПСЭ в значительной части обеспечена эталонными средствами для воспроизведения и передачи единицы от эталона к рабочим средствам измерений и практически внедрена в большей своей части. Значения метрологических характеристик, указанных в новой Государственной поверочной схеме, приведены в соответствие с уже достигнутыми и прогнозируемыми в ближайшей перспективе характеристиками современных средств измерений, выпускаемых отечественными предприятиями и ведущими зарубежными фирмами.

В этой же главе представлены результаты исследований комплексной эталонной меры и весьма перспективной перестраиваемой динамической меры, используемых для передачи единицы от ГПСЭ рабочим эталонам и средствам измерений. Работы по модернизации ГПСЭ выполнялись в рамках реализации ведомственной программы Росстандарта по совершенствованию эталонной базы России. Усовершенствованный специальный эталон был принят Межведомственной комиссией, одобрен коллегией Росстандарта и в установленном порядке утвержден в качестве Государственного первичного эталона в феврале 2015 года.

В шестой главе представлены материалы, связанные с внедрением результатов исследований и разработок, которые включали в себя:

- Создание и ввод в эксплуатацию приборов и аппаратуры, входящих в состав измерительно-калибровочного комплекса, в соответствии с двумя проектами: «Создание метрологического комплекса и нормативно-методической базы для обеспечения единства измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне» и «Создание методов и средств метрологического обеспечения параметров рельефа большепольных поверхностей в нанометровом диапазоне», выполненных в рамках реализации федеральной целевой программы (ФЦП) «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации в 2008-2011 гг.». Результаты проектов получили положительную оценку межведомственной приемочной комиссии.
- Модернизацию и внедрение усовершенствованного государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров шероховатости ГЭТ 113-2010, в результате чего удалось расширить диапазон измерений параметров рельефа и шероховатости поверхности с 0,1 – 1600 мкм до 0,001 – 3000 мкм с одновременным повышением в 2 раза точности воспроизведения единицы длины в этом диапазоне. Работа выполнена в рамках реализации ведомственной программы Росстандарта по развитию и совершенствованию эталонной базы России.
- Разработку и внедрение межгосударственного стандарта на усовершенствованную государственную поверочную схему средств измерений параметров шероховатости в диапазоне 0,001÷3000 мкм, которая позволит в ближайшие годы полностью обеспечить измерительно-калибровочные потребности отечественных предприятий в реальных отраслях экономики.
- Разработку и ввод в обращение трех стандартов, гармонизированных с международными требованиями, в том числе:
 - ГОСТ Р 8.743—2011/ISO/TR 14999-1:2005 Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 1. Термины, определения и основные соотношения;
 - ГОСТ Р 8.745—2011/ISO/TR 14999-2:2005 Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 2. Измерения и методика оценки результатов;
 - ГОСТ Р 8.744—2011/ISO/TR 14999-3:2005 Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 3. Калибровка и аттестация интерферометров. Методика измерений оптических волновых фронтов.

Общие выводы.

1. Показано, что при характеристике шероховатости поверхности ареальные (микротопографические) параметры при тех же точностных требованиях имеют более высокую статистическую устойчивость, чем профильные. При этом целесообразно использовать только те ареальные параметры, которые имеют прямой профильный эквивалент для сравнения (например, R_q и S_q). Наибольшее различие между профильными и ареальными методами характеристики заключено в используемых методах фильтрации. Ареальный гауссовый фильтр, позволяет при измерениях поверхности устойчиво разделять шероховатость и волнистость.

2. При построении функциональных моделей взаимодействия контактирующих поверхностей целесообразно применять фрактальные методы характеристики. При этом для адекватной оценки шероховатости поверхности необходимо использовать параметры: фрактальной размерности D_0 ; степени однородности структуры; степени скрытой периодичности и меры упорядоченности. В отдельных случаях геометрические характеристики и параметры профилей поверхностей легче описываются методами фрактальной геометрии, чем эвклидовой.

3. На основе анализа факторов, влияющих на формирование неопределенности измерений параметров шероховатости поверхности методами оптической интерферометрии установлено, что основными источниками систематической инструментальной составляющей неопределенности по типу В являются отклонения от плоскостности и опорной (референтной) поверхности, а также неточности изготовления и монтажа оптических элементов лазерного интерферометра. Случайная инструментальная составляющая неопределенности по типу А, проявляющаяся при повторных измерениях, обусловлена неточностями юстировки всего интерферометра в целом по отношению к контролируемой поверхности. Влияние этих факторов должно учитываться при выборе алгоритмов обработки интерферограмм.

4. Статистическими исследованиями выявлено, что наибольший вклад в методическую составляющую неопределенности по типу А вносят погрешности измерений текущих порядков интерференции, которые могут достигать 0,08 интерференционной полосы. Составляющей, определяемой погрешностью измерения текущих координат, можно пренебречь.

5. Основным фактором, влияющим на воспроизводимость показаний современных лазерных интерферометров, является шум интенсивности лазерного излучения. При этом наименьшее значение среднеквадратичного отклонения разности волновых фронтов составило 0,01 полосы.

6. Экспериментально доказано, что при измерении параметров шероховатости поверхности методами интерферометрии могут быть реализованы принципы оптического сверхразрешения, позволяющие при точной регистрации фазовых изображений существенно превзойти теоретический (рэлеевский) предел разрешения. Показано, что разрешающая способность определяется не аппаратными свойствами самого прибора, а точностью измерений характеристик выходного сигнала.

7. В результате исследований установлено, что:

- для малых значений высоты профиля (меньше 10нм) необходимо учитывать эффект рассеяния зондирующего электромагнитного излучения наноструктурами исследуемой поверхности, поскольку удельный вес (вклад) этого фактора может составлять от 15% до 30% от неопределенности, обусловленной собственными шумами лазерного интерференционного микроскопа. При этом целесообразно учитывать в совокупности источники неопределенности, вызываемые рассеянием зондирующего излучения, шумами интенсивности в фотоприемнике и алгоритмом реконструкции профиля рельефа исследуемой поверхности;
- результаты численного моделирования процедуры восстановления рельефа поверхности с учетом рассеяния излучения на изолированных наноразмерных неоднородностях и поверхностях периодического профиля, а также результаты реальных измерений на лазерном интерферометре имеют хорошую сходимость с паспортными данными на аттестованные меры, использованные при экспериментах.

8. На основе анализа чувствительности алгоритмов обработки интерферограмм методом фазовых шагов доказано, 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.

9. Использование 9-ти шагового алгоритма обработки интерферограмм позволяет добиться оценки параметров шероховатости поверхности с разрешением лазерного интерферометра до $\lambda/1000$.

10. Предложенная структурная схема измерительно-калибровочного комплекса на основе средств измерений, работающих на разных физических принципах, позволяет при проведении внутрилабораторных сличений результатов измерений в значительной степени учесть методическую погрешность, а также уменьшить неопределенность измерений по типу В.

11. Разработанный и реализованный комплекс мер по совершенствованию системы обеспечения единства и достоверности измерений параметров шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне, включая модернизацию Государственного эталона, государственной поверочной схемы и нормативно-методической базы, позволит в ближайшие годы полностью обеспечить измерительно-калибровочные потребности предприятий реального сектора экономики Российской Федерации.

Таким образом, в диссертационной работе содержится решение важной проблемы, имеющей существенное значение для разработки и совершенствования 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 оборонно-промышленного комплекса страны.

Основные материалы диссертации приведены в следующих публикациях:

1. Золотаревский С.Ю. Опыт NIST по изучению измерительных потребностей современных инновационных технологий //Законодательная и прикладная метрология, №6 2007, С. 5-7 (0,2 п.л.).

2. Левин Г.Г., Золотаревский С.Ю. Количественная фазовая микроскопия на основе принципов интерференционной рефрактометрии // Метрология, №3 2008, С. 15-22, (0,5/0,25 п.л.).

3. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Золотаревский С.Ю. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы //Приборы, №3 (93) 2008, С. 1-11, (0,7/0,25 п. л.).

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

С.15-25, (0,7/0,2 п. л.).

5. Левин Г.Г., Илюшин Я.А., Кононогов С.А., Золотаревский С.Ю. Моделирование процессов рассеяния оптического излучения наноразмерными структурами // Метрология, №12, 2009г, С. 7-14, (0,5/0,2 п. л.).

6. 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, С. 10-22, (0,8/0,3 п. л.).

7. Гусев А.С., Золотаревский С.Ю., Лясковский В.Л., Волошин Д.В., Сравнительные исследования измерительных возможностей методов атомно-силовой микроскопии и оптической интерферометрии // Измерительная техника, № 8, 2010 г., С. 34 – 36, (0,2/0,1 п. л.).

8. Кононогов С.А., Золотаревский С.Ю., Лысенко В.Г. Метрологическое обеспечение параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения, С. 567-587 // в книге (учебном пособии) под редакцией В.Н. Крутикова «Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии», Москва, издательство «Логос», 2011г., 590 С. ISBN 978-5-98704-613-5, (37/1,3/1,0 п. л.)

9. Золотаревский С.Ю., Савченко А.Г., Кононогов С.А., Крутиков В.Н. Формирование баз данных в области метрологического обеспечения нанотехнологий и продукции наноиндустрии // Законодательная и прикладная метрология, №1, 2012 г., С. 16-22, (0,45/0,15 п. л.).

10. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Золотаревский С.Ю. Неопределенность трехмерных измерений геометрических параметров шероховатости поверхности // Приборы, № 5, 2008 г., С. 53-58, (0,4/0,2 п. л.).

11. Кононогов С. А., Лысенко В. Г., Гоголев Д. В., Золотаревский С. Ю. Эталонная база прецизионного машиностроения // Метрология, № 3, 2009 г., С. 3-28, (1,6/0,4 п. л.).

12. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В., Золотаревский С.Ю. Методические основы 3-D измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы // Приборы, № 12, 2008 г., С. 49-55, (0,4/0,1 п. л.).

13. В. Г. Лысенко, В. В. Соловьев, П. Н. Лускинович, С. Ю. Золотаревский, К. Л. Губский. Нанометрология и особенности метрологического обеспечения измерений параметров шероховатости и рельефа наноструктурированных поверхностей // Измерительная техника, № 11, 2010 г., С. 17-21, (0,3/0,1 п. л.).

14. Илюшин Я.А., Ломакин А.Г., Золотаревский С.Ю., Левин Г.Г., Кононогов С.А. Численное моделирование процедуры восстановления рельефа оптической поверхности с учетом рассеяния излучения на наноструктурах // Метрология. 2010. № 2. С. 3-12, (0,6/0,2 п. л.).
15. Д.А. Новиков, С.Ю. Золотаревский, Г.Н. Вишняков. Измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии ФИЗО // Метрология, № 12, 2012 г., С. 17-24, (0,5/0,2 п. л.)
16. Моисеев Н.Н., Золотаревский С.Ю. Эталонные средства измерений в оптической интерферометрии высокого разрешения // Измерительная техника. 2012. № 8. С. 35-37, (0,2/0,1 п. л.).
17. С.Ю. Золотаревский, В.Г. Лысенко, Н.А. Табачникова, Ф.В. Булыгин, А.С. Гусев, В.Л. Ляковский. Специфика измерительных задач при анализе рельефа поверхностей в нанометровом диапазоне линейно-угловых размеров. // Метрология, №2, 2013г., С. 41-52, (0,75/0,3 п. л.).
18. С.Ю. Золотаревский, С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко, Н.А. Табачникова, Г.Г. Левин. Методология характеристики рельефа 3-D поверхности по её профильным и топографическим параметрам в нанометровом диапазоне// Метрология, №2, 2013г., С. 4-12, (0,6/0,2 п. л.).
23. С.А. Кононогов, С.Ю. Золотаревский, Ф.В. Булыгин, В.Н. Крутиков, В.Л. Ляковский. Ареальные методы анализа топографии и текстуры поверхности в микро- и нанометровом диапазонах. // Метрология, №2, 2013г., С. 13-24, (0,75/0,3 п. л.).
24. В.Н. Крутиков, С.Ю. Золотаревский, В. Г. Лысенко, В.Л. Ляковский. Топологические параметры текстуры функциональных поверхностей. // Метрология, №2, 2013г., С. 25-32, (0,5/0,2 п. л.).
25. С.Ю. Золотаревский, Д.А. Новиков, А.С. Гусев, В.Л. Ляковский. Фрактальные методы характеристики топографии и текстуры поверхности. // Метрология, №2, 2013г., С. 33-40, (0,5/0,3 п. л.)
26. Золотаревский С.Ю., Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Левин Г.Г., Ляковский В.Л., Гусев А.С., Голубев С.С. Специфика формирования неопределенности измерений геометрических параметров рельефа поверхности методами интерферометрии высокого разрешения // Метрология. 2013. № 8. С. 11-21, (0,6/0,2 п. л.).
27. Булыгин Ф.В., Золотаревский С.Ю., Кононогов С.А., Илюшин Я.А., Левин Г.Г., Ляковский В.Л. Анализ методов сверхразрешения в оптической

интерференционной микроскопии // Метрология. 2013. № 8. С. 22-30, (0,6/0,2 п. л.).

28. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В., Золотаревский С.Ю. Измерения нанорельефа оптических поверхностей // Мир измерений. 2009. № 2. С. 51-54, (0,25/0,05 п. л.).

29. Новиков Д.А., Кононогов С.А., Золотаревский С.Ю., Вишняков Г.Н., Гусев А.С., Левин Г.Г., Ляковский В.Л. Анализ неопределенностей, обусловленных методическими и инструментальными погрешностями интерферометрии параметров рельефа и формы поверхности // Метрология. 2013. № 8. С. 31-37, (0,4/0,1 п. л.).

30. Кононогов С.А., Золотаревский С.Ю., Лысенко В.Г., Ляковский В.Л. Основные физические эффекты, влияющие на формирование неопределенности измерений параметров рельефа поверхностей нанометровом диапазоне размеров // Метрология. 2013. № 8. С. 4-10. , (0,4/0,2 п. л.)

31. Золотаревский С.Ю., Иванникова Н.В., Лысенко В.Г. Метрологический комплекс для измерений параметров рельефа и шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 5 (108). С. 30-37, (0,5/0,3 п. л.).

32. 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, С. 117-119, (0,2 п. л.).

33. Золотаревский С.Ю. Интерферометрия формы поверхностей оптических элементов //XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2008, С. 86-87, (0,15 п. л.).

34. Золотаревский С.Ю. Интерференционная рефрактометрия параметров и характеристик процессов в жидких конденсированных средах //XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2008, С. 75-77, (0,2 п. л.).

35. Золотаревский С.Ю. Использование современных средств микроскопии сверхвысокого разрешения для обеспечения прослеживаемости результатов измерений нанощероховатостей поверхностей //XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2009, С. 199-202, (0,25 п. л.).

36. В.Л. Ляковский, С.Ю. Золотаревский, А.В. Полухин, В.С. Федоренко. Возможности электронной и конфокальной микроскопии при исследовании геометрических параметров прецизионных алмазных резцов». //XIX Всероссийская

научно-техническая конференция Конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2013, С. 86-87, (0,15/0,1 п. л.).

37. Г.Н. Вишняков, С.Ю. Золотаревский, Г.Г. Левин, В.Л. Лясковский. Нормативно-методическое обеспечение интерферометрии высокого разрешения». //XIX Всероссийская научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2013, С. 86-87, (0,15/0,1 п. л.).

38. В.Л. Лясковский, С.Ю. Золотаревский, А.С. Гусев, А.В. Полухин. Возможности измерительного комплекса интерференционной микроскопии фирмы «Leica». //XIX Всероссийская научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», ВНИИОФИ, Москва, 2013, С. 86-87, (0,15/0,05 п. л.).

39. Д.А. Новиков, С.Ю. Золотаревский, В.Г. Лысенко, Г.Н. Вишняков Измерительно-калибровочная установка для измерения плоскостности поверхности на базе большепольной интерферометрии Физо // Первая Всероссийская научно-техническая Конференция «Метрология в нанотехнологиях» Росстандарт, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва, 2014, С. 65-68, (0,25/0,05 п. л.).

40. С.Ю. Золотаревский, В.Г. Лысенко, Д.А. Новиков, В.Л. Лясковский. Совершенствование Государственного первичного специального эталона параметров шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне // Первая Всероссийская научно-техническая Конференция «Метрология в нанотехнологиях» Росстандарт, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва, 2014, С. 103-105, (0,2/0,05 п. л.).

41. Н.П. Кутузов, Г.В. Максимов, В.Л. Лясковский, С.Ю. Золотаревский. Исследование ориентации молекул в мембранах живых клеток посредством рамановской микроспектроскопии. Факторы, влияющие на точность измерений// Первая Всероссийская научно-техническая Конференция «Метрология в нанотехнологиях» Росстандарт, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва, 2014, С. 59-61, (0,2/0,05 п. л.).

42. 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, (0,3/0,1 п. л.).

43. Lysenko V., S. Kononogov, S. Zolotarevskiy Comparison of Different Methods for 3D Measurements of Surface Roughness Etalons // Cadam 2009 7 th International Conference on Computer Aided Desidn and Manufacturing. September 22 th – September 26 th 2009.St. grad – Hvar. Crootia, (0,3/0,1 п. л.).