*На правах рукописи*

КАЗИЕВА Татьяна Вадимовна

# ГЕТЕРОДИННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

10 МАЙ 2017

Автор:

006655857

Москва 2017

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:

**Кузнецов Андрей Петрович** — доктор физико-математических наук, доцент, заместитель директора Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

**Городецкий Михаил Леонидович** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Физики колебаний МГУ имени М.В. Ломоносова

**Телешевский Владимир Ильич** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Измерительные информационные системы и технологии МГТУ «СТАНКИН»

Ведущая организация:

**ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева**

Защита диссертации состоится «7» июня 2017 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте: http://ods.mephi.ru

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «19» апреля 2017 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.130.05, д. ф.-м. н. _____/Стариков Р. С.

**Общая характеристика работы**

Создание наукоемких технологий, обеспечивающих кардинальные изменения в структуре и техническом уровне производства, и выход отечественного производства на мировой уровень в значительной мере сдерживаются недостаточным развитием метрологического обеспечения [1]. В настоящее время прогресс в самых разных областях науки и техники (электроника, материаловедение, приборостроение, микробиология, медицина и др.) связан с необходимостью проведения исследований структуры поверхности объектов на субмикронном уровне и получения трехмерной структуры изображения объекта исследований с нанометровым разрешением. Так, уже сегодня технологии электронной промышленности перешли в разряд нанотехнологий, т. е. технологий, характерный размер элементов в которых составляет десятки нанометров [2]. Следовательно, для контроля их геометрических параметров необходимо применение техники субнанометровых измерений.

Достижение предельных возможностей в измерениях трехмерных структур на субмикронном уровне связано с использованием высокоразрешающих методов сканирующей зондовой (туннельной и атомно-силовой) и растровой электронной микроскопии. Основная проблема измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне связана со сложными и часто неоднозначными соотношениями между объектом измерений и его изображением, получаемым этими методами. Регистрируемое зондовыми методами изображение не всегда соответствует реальному профилю поверхности измеряемого элемента рельефа. Эта проблема имеет фундаментальный характер и усугубляется сложной природой взаимодействия измерительного инструмента с объектом измерений, их сильным взаимным влиянием. Следовательно,

появляется необходимость независимого прецизионного измерения перемещения и взаимного расположения измерительного зонда и объекта, а также фиксации положения объекта с погрешностью ~ 0,1 нм, соответствующей локальности метода сканирующей зондовой микроскопии. В мировом научно-техническом сообществе, работающем в области зондовой микроскопии, эта проблема была сформулирована в 1990-х гг., и оптимальным решением был признан зондовый микроскоп, оснащенный оптическим каналом на основе многоканального интерферометра для измерения перемещений сканера СЗМ в трех взаимно ортогональных направлениях и угловых искажений, возникающих при отклонении положения объекта относительно направления сканирования [3]. Существующие на данный момент интерферометрические устройства в составе сканирующих зондовых микроскопов не позволяют достигать субнанометровой неопределенности измерений, кроме того, оснащение ими СЗМ приводит к увеличению габаритов измерительной системы. Поэтому актуальным является разработка методов и их аппаратной реализации метрологического обеспечения сканирующей зондовой микроскопии на основе многоосевых лазерных интерферометров, непосредственно встраиваемых в сканирующие зондовые микроскопы.

Вышесказанное предопределило цель настоящей работы и решаемые при этом задачи.

**Целью диссертационной работы является:**

Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений перемещений в сканирующей зондовой микроскопии на основе гетеродинной лазерной интерферометрии. Исследование и устранение физических факторов, ограничивающих возможность достижения субнанометрового разрешения.

**Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:**

1. Разработка трехкоординатного гетеродинного лазерного интерферометра, позволяющего проводить измерения перемещений сканера зондового микроскопа с субнанометровым разрешением и обеспечивающего прослеживаемость геометрических измерений к эталону метра через длину волны стабилизированного лазера.

2. Исследование влияния основных физических и технических факторов, приводящих к ошибкам при измерении перемещений гетеродинным лазерным интерферометром.

3. Исследование характеристик динамических мер геометрических размеров с помощью сканирующего зондового микроскопа, оснащенного трехкоординатным гетеродинным интерферометром.

4. Разработка трехкоординатного интерферометра с оптоволоконной системой транспортировки линейно поляризованного лазерного излучения к оптическому блоку, позволяющего измерять функции формы индентора нанотвердомера с нанометровой точностью.

5. Разработка методики измерения функции формы индентора нанотвердомера с помощью метрологического АСМ, оснащенного лазерным интерферометром.

**Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем:**

1. Впервые предложена моноблочная оптическая схема трехкоординатного измерителя перемещений с субнанометровым разрешением на основе методов гетеродинной лазерной интерферометрии, обеспечивающего прослеживаемость измерений к эталону метра через длину волны стабилизированного лазера.

2. Впервые для системы фазовых измерений в гетеродинном интерферометре применена квадратурно-дифференциальная схема прямого аналого-цифрового преобразования фазомодулированного сигнала с последующей цифровой обработкой информационных отсчетов, что позволило обеспечить цифровое разрешение на уровне 0,01 нм.

3. С помощью метрологического СЗМ, оснащенного трехкоординатным гетеродинным интерферометром, впервые были проведены исследования характеристик монокристаллических динамических мер вертикального смещения в нанометровом диапазоне с точностью 0,2 нм и измерены их калибровочные характеристики.

4. Предложена и реализована измерительная система на основе трехкоординатного гетеродинного интерферометра с оптоволоконной системой транспортировки линейно поляризованного лазерного излучения к оптическому блоку для измерения характеристик алмазных инденторов нанотвердомеров.

5. Предложена и реализована методика измерения формы алмазных инденторов нанотвердомеров с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), оснащенного трехкоординатным гетеродинным интерферометром.

**Практическая значимость работы**

1. Разработан трехкоординатный гетеродинный интерферометр, встраиваемый в серийно выпускаемый СЗМ «НаноСкан-3Di» и позволяющий проводить измерения перемещений сканера СЗМ в диапазоне до 500 мкм в горизонтальной плоскости и до 50 мкм в вертикальном направлении с разрешением 0,01 нм.

2. На основе анализа источников неопределенностей, возникающих в трехкоординатном гетеродинном лазерном

интерферометре, и сличения результатов измерений рельефных мер, полученных в СЗМ «НаноСкан-3Di», с результатами аналогичных измерений в PTB (Германия) показано, что неопределенность измерения составляет 0,2 нм.

3. Разработан трехкоординатный гетеродинный лазерный интерферометр с оптоволоконной системой транспортировки линейно поляризованного лазерного излучения к оптическому блоку, встраиваемый в серийно выпускаемые нанотвердомеры и позволяющий измерять функции наконечников зондов с субнанометровой точностью.

4. Метрологический СЗМ «НаноСкан-3Di», оснащенный разработанным трехкоординатным гетеродинным интерферометром, вошел в состав Государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров шероховатости Rmax, Rz, Ra (ГЭТ 113-2014).

5. Измерительная система на основе трехкоординатного гетеродинного интерферометра с оптоволоконной транспортировкой линейно поляризованного лазерного излучения вошла в состав Государственного первичного эталона твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования (ГЭТ 211-2014).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Оптическая схема моноблочного трехкоординатного гетеродинного лазерного интерферометра, позволяющего измерять перемещения сканера зондового микроскопа с разрешением 0,01 нм и неопределенностью ~ 0,2 нм.

2. Численные расчеты влияния источников тепла внутри изолирующего бокса и конвекционных потоков воздуха на дрейф и флуктуации оптической длины плеч интерферометра, позволившие минимизировать погрешности измерений.

3. Оптическая схема моноблочного трехкоординатного гетеродинного интерферометра с оптоволоконной системой транспортировки линейно поляризованного лазерного излучения, позволяющая довести ошибку Аббе до уровня $10^{-2}$ нм/мкм и минимизировать тепловые дрейфы при измерении перемещения сканера зондового микроскопа.

4. Результаты исследований калибровочной зависимости и чувствительности к управляющему напряжению монокристаллических динамических мер вертикального смещения в нанометровом диапазоне с помощью сканирующего зондового микроскопа, оснащенного лазерным интерферометром, позволившие подтвердить метрологические характеристики данных мер и возможность их использования для поверки СЗМ.

5. Методика определения функции формы поверхности инденторов нанотвердомеров по результатам их сканирования тестовыми структурами с помощью метрологического АСМ, оснащенного лазерным интерферометром.

**Личный вклад автора**

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии.

**Апробация работы**

Основные результаты изложены на отечественных и международных конференциях: Optics and Measurement 2014 (Liberec, Czech Republic); Scanning microscopies 2015 (Monterey, USA); 24th Annual International Laser Physics Workshop, 2015 (Shanghai, China); XVI Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», 2012 (Москва); Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013 (Москва); Международная конференция «Лазеры. Измерения.

Информация», 2013, 2014 (Санкт-Петербург); XIII Всероссийская выставка Научно-технического творчества молодежи (НТТМ), 2014 (Москва); VII Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 2014 (Москва); XI Курчатовская молодежная научная школа, 2014 (Москва); III Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 2015 (Москва); Международная конференция-конкурс молодых физиков 2015 (Москва); XXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», 2015 (Москва); Физика СПб-2015 (Санкт-Петербург); 2nd Conference on Plasma and Laser Research and Technologies, 2016 (Москва).

Основное содержание диссертации опубликовано в 24 печатных работах, из них 8 — в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов ВАК (из них 7 опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus).

Сканирующий зондовый микроскоп, оснащенный трехкоординатным интерферометром, вошел в состав Государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров шероховатости Rmax, Rz, Ra (ГЭТ 113-2014).

Разработанный интерферометр с оптоволоконной транспортировкой линейно поляризованного лазерного излучения вошел в состав Государственного первичного эталона твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования (ГЭТ 211-2014).

**Содержание диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи, дана оценка практической значимости, определена научная новизна полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту диссертационной работы. Приведены сведения об апробации результатов работы и публикациях автора.

**В первой главе** на основе обзора литературы проведен анализ методов исследования материалов, позволяющих не только наблюдать структуру на нанометровых масштабах, но и получать количественную оценку различных физических параметров. Достижение предельных возможностей в данной области связано с развитием сканирующей зондовой микроскопии. Анализ существующих систем для измерения перемещений сканеров зондовых микроскопов, показал, что метрологическое обеспечение измерений СЗМ возможно в результате оснащения его многоосевыми лазерными интерферометрами. Проведено сравнение гомодинного и гетеродинного интерферометров, и сделан вывод о том, что высокая потенциальная точность и помехоустойчивость гетеродинной интерферометрии определяет ее выбор в качестве основы для создания метрологического СЗМ с субнанометровым разрешением.

**Вторая глава** посвящена разработке трехкоординатного гетеродинного лазерного интерферометра, встроенного в СЗМ и обеспечивающего метрологическое сопровождение измерений с субнанометровой точностью (рис. 1).

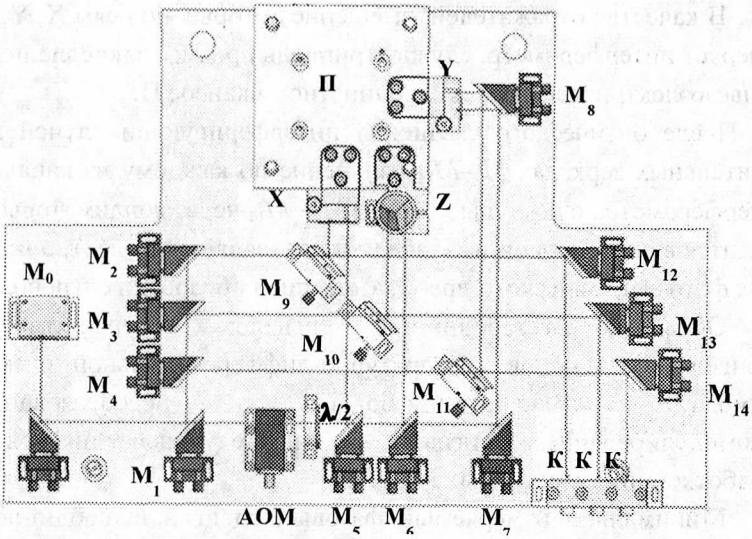


Рис. 1. Оптическая схема трехкоординатного гетеродинного интерферометра: П – пьезоэлектрический стол, М – зеркало для ввода излучения в интерферометр, АОМ – акусто-оптический модулятор, $M_1$–$M_{14}$ – оптические зеркала, λ/2 – полуволновая пластинка, К – коллиматоры, X, Y, Z – триппель-призмы

Для обеспечения прослеживаемости измерений к единице длины в качестве источника излучения используется стабилизированный He-Ne лазер (длина волны в вакууме $\lambda = 632{,}991084$ нм) мощностью 1 мВт. Источник излучения закреплен на обратной стороне оптической плиты. В оптическую схему интерферометра излучение вводится зеркалом $M_0$. После разделения лазерного излучения зеркалом $M_1$ на опорное и измерительное плечо, измерительные каналы интерферометра формируются зеркалами $M_2$—$M_5$—$M_9$, $M_4$—$M_7$—$M_8$—$M_{11}$ и $M_3$—$M_{10}$—$M_6$. Гетеродинный сдвиг частоты излучения в измерительном канале осуществляется акусто-оптическим модулятором (АОМ).

В качестве отражателей, смещение которых по осям X, Y, Z измеряет интерферометр, служат триппель призмы, закрепленные на пьезоэлектрическом трехкоординатном сканере П.

После оптического смешения интерферирующих лучей на делительных зеркалах $M_9$–$M_{11}$ излучение по каждому из каналов интерферометра с помощью зеркал $M_{12}$–$M_{14}$ через коллиматоры $K$ вводится в оптоволоконные кабели и направляется в электронный блок фотоэлектрического преобразования и обработки сигналов.

Обработка гетеродинных сигналов интерферометра реализована на основе квадратурно-дифференциальной схемы прямого аналого-цифрового преобразования фазомодулированных сигналов с последующей цифровой обработкой информативных отсчетов.

Минимально измеряемый фазовый сдвиг в гетеродинном интерферометре ограничивается шумами фотоэлектрического преобразования (рис. 2). Для обеспечения точности измерений на уровне 0,1 нм, что соответствует измеряемому фазовому сдвигу в $1\times10^{-4}$ рад, необходимо обеспечить величину отношения сигнал/шум в сигнале не менее 6000.

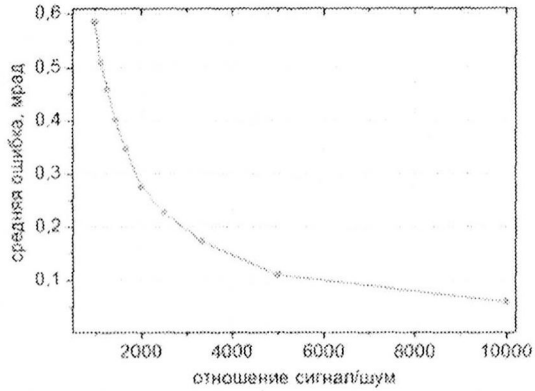


Рис. 2. Минимально необходимое отношение сигнал/шум на входе измерителя фазы; входной сигнал: синусоида с действующим значением 1 В; шум: нормальный, с нулевым средним

Для обеспечения требуемой точности необходимо использовать АЦП с разрядностью не ниже 14 бит, однако их частота дискретизации не превышает 150 МГц. Подобное аппаратное ограничение на реализацию цифрового фазометра потребовало в качестве акустической среды АОМ использовать одноосный положительный анизотропный кристалл парателлурита ($TeO_2$), обладающий высокими значениями фотоупругих постоянных и низкой скоростью сдвиговых акустических волн. Оба свойства обеспечивают высокое значение коэффициента акустооптического качества, что позволяет работать с малыми акустическими мощностями, и обеспечивает относительно большие углы между падающим и дифрагированным пучками света. Применение АОМ с частотой модуляции 36 МГц позволило использовать АЦП с частотой дискретизации 144 МГц (разрядность 14 бит) и таким образом реализовать цифровой фазометр с прямым преобразованием высокочастотного сигнала в низкочастотную фазу. Высокая итоговая частота оцифровки фазы сигнала в 36 МГц позволяет реализовать режим усреднения с помощью цифрового фильтра нижних частот и при временном разрешении в 1 мс позволяет достигать разрешения измерительной системы $10^{-5}$ рад.

Особенностью АОМ на основе одноосного положительного анизотропного кристалла парателлурита ($TeO_2$) является поворот поляризации дифрагированного пучка на 90° относительно падающего. Поэтому в оптической схеме после АОМ установлена фазовая пластинка $\lambda/2$, согласующая поляризации излучения опорного и измерительного плеч.

Для оценки величины неопределенности измерений интерферометром был проведен анализ источников ошибок. Показано, что наиболее трудно устранимыми являются помехи, вызванные изменением показателя преломления воздуха,

температурное расширение платформы интерферометра, а также вибрации механических узлов оптической схемы.

Несмотря на то, что для защиты от внешних факторов система помещена в защитный бокс, в самой конструкции интерферометра и сканирующего микроскопа присутствуют источники тепла. Для исследования воздействия выделяемой этими устройствами тепловой мощности на характеристики интерферометра было проведено моделирование в среде Comsol (рис. 3).

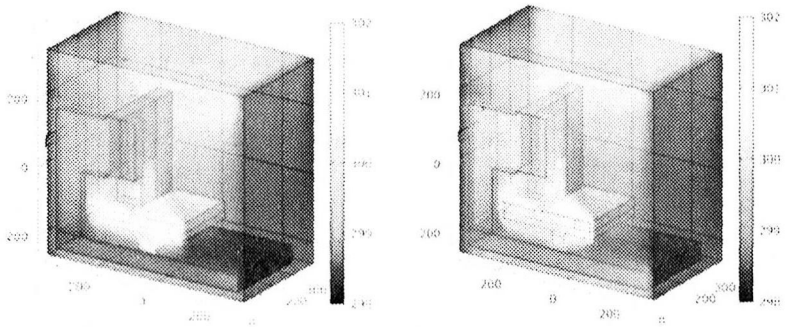

Рис. 3. Распределение температур в термоизолирующем боксе: а) через 2 ч после включения, б) через 10 ч

Изменение показателя преломления воздуха при нескомпенсированной разности длин плеч интерферометра приводит к возникновению набега фазы (погрешности дрейфа нуля интерферометра). На основе результатов моделирования были рассчитаны значения ошибки для всех трех осей интерферометра. Стабилизация температуры оптической схемы приводит к уменьшению величины данной ошибки, и спустя 15 часов после включения системы она не превосходит 0,1 нм.

Неопределенность измерений, возникающая в результате теплового расширения платформы интерферометра, также уменьшается при выравнивании температуры внутри изолирующего бокса. Так, при неравноплечности в 10 мм, в

первые часы работы ошибка равна 250 нм, а через 15 часов работы она достигает величины в 0,9 нм.

Флуктуации давления атмосферы также оказывают влияние на результаты измерения. Вариации звукового или атмосферного давления величиной 10 Па приводят к сигналу, регистрируемому интерферометром, величиной ~ 1 нм (рис. 4).

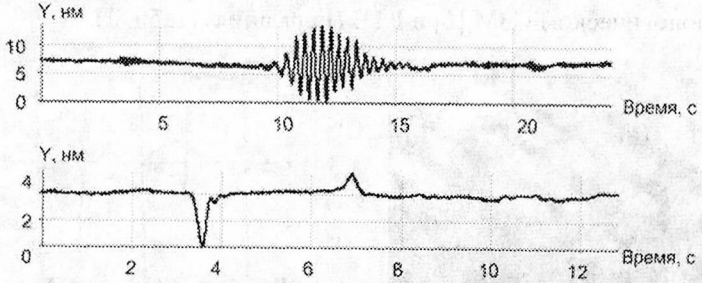


Рис. 4. Данные, полученные с Z-канала трехкординатного гетеродинного интерферометра в режиме контакта зонда с поверхностью: а) воздействие сейсмической помехи; б) барическое возмущение

Для устранения влияния внешних факторов были применены средства термо-, звуко- и виброизодяции, которые позволили уменьшить случайную шумоподобную ошибку до 0,1 нм.

Оценка влияния ошибки Аббе [4], на неопределенность измерений интерферометра показала, что для осей X и Y она не превосходит $2{,}5\times10^{-9}$ нм/мкм, а для оси Z уровень ошибки может быть доведен до 1 нм/мкм. Основные характеристики интерферометра приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики трехкоординатного гетеродинного интерферометра

| | |
|---|---|
| Диапазон сканирования по осям X, Y, Z, мкм | 100, 100, 10 |
| Разрешение по всем трем осям не хуже, нм | 0,01 |
| Максимальная скорость сканирования, мкм/с | 100 |
| Уровень шумов в полосе от 1 Гц до 1 кГц (не более), нм | 1 |

Для определения метрологических характеристик разработанного на основе СЗМ Наноскан-3D метрологического зондового микроскопа, оснащенного трехкоординатным интерферометром, было проведено сличение результатов измерений тестовых структур $TGZ_1$, $TGZ_2$, $TGZ_3$ (рис. 5) [5] с результатами аналогичных измерений, проведенных на метрологическом СЗМ [6] в РТВ (Германия) (табл. 2).

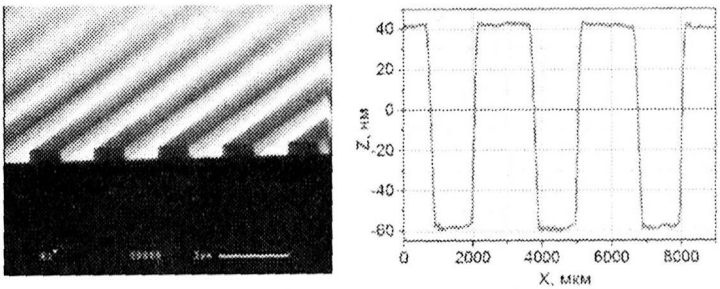


Рис. 5. Профиль линейной меры TGZ2, измеренный с использованием интерферометра

Таблица 2. Результаты измерения характеристик тестовых структур

| Мера | Высота ступеней, нм | |
|---|---|---|
| | НаноСкан-3Di | РТВ |
| $TGZ_1$ | 18,1± 0,2 | 18,4 ± 1,0 |
| $TGZ_2$ | 100,0 ± 0,4 | 101,1 ± 1,6 |
| $TGZ_3$ | 488,0 ± 0,9 | 489,0 ± 1,8 |

Значения, измеренные на СЗМ «НаноСкан-3Di», попали в 95% доверительный интервал, приведенный РТВ. Данные о периоде структур, полученные на «НаноСкан-3Di», также совпали с данными РТВ. При этом рассогласование данных о среднем значении периода решеток не превысило 2 нм. Для всех исследованных решеток результаты измерения отличались от

значения 3 мкм, приведенного в сертификатах РТВ, не более, чем на 10 нм, а относительная погрешность составила $5\times10^{-3}$.

**Третья глава** посвящена разработки трехкоординатного гетеродинного лазерного интерферометра с расширенным диапазоном измерения до 500×500×50 мкм. Схема разработанного интерферометра приведена на рис. 6.

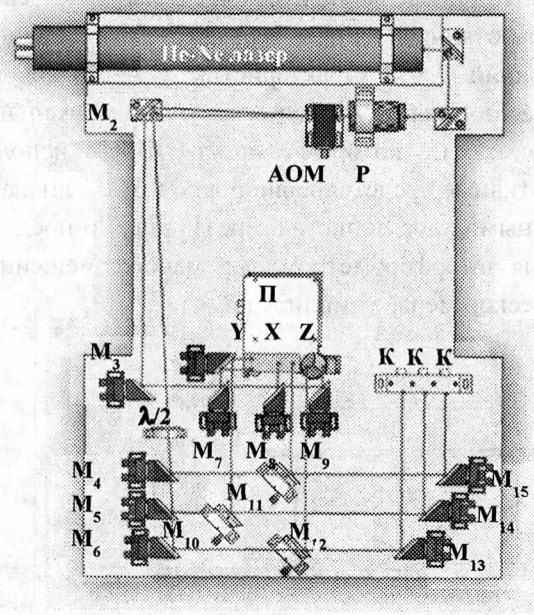


Рис. 6. Оптическая схема трехкоординатного гетеродинного интерферометра с расширенным диапазоном измерений: П- пьезоэлектрический стол, АОМ – акустооптический модулятор, Р – расширитель лазерного пучка, $M_0$- $M_{16}$ – оптические зеркала, λ/2 - полуволновая пластинка, К – коллиматоры, X, Y, Z – триппель призмы

Основными отличиями данной схемы являются:

- использование АОМ не только для гетеродинного сдвига частоты между лучами, но и для расщепления лазерного пучка на

опорный (нулевой порядок дифракции) и измерительный (первый порядок дифракции);

- модернизация крепления триппель призм, позволяющая уменьшить ошибку Аббе для оси Z в 4 раза;
- уменьшение конвекционных потоков воздуха в термоизолирующем боксе за счет вынесения лазерного излучателя за пределы оптической схемы интерферометра.

Разработанный интерферометр был использован для исследований характеристик монокристаллических динамических мер вертикального и горизонтального смещения [7] (рис. 7а), которые могут быть использованы как альтернативные средства калибровки СЗМ в диапазоне 1–200 нм с рекордными характеристиками. На рис. 7б представлен пример измерения интерферометром сверхмалого смещения поверхности динамической меры с амплитудой 1 нм.

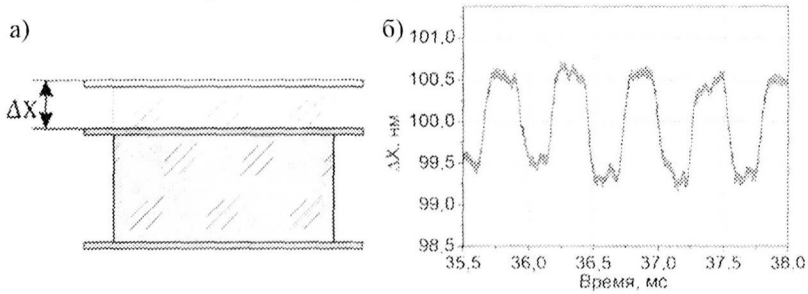


Рис. 7. Конструкции динамической меры вертикального смещения (а), смещение поверхности меры на величину ΔX под действием напряжения (б)

Проведенные измерения позволили построить калибровочную зависимость и определить чувствительность к управляющему напряжению (196±8 пм/В) и нелинейность (0,4%) используемого материала (рис. 8) .

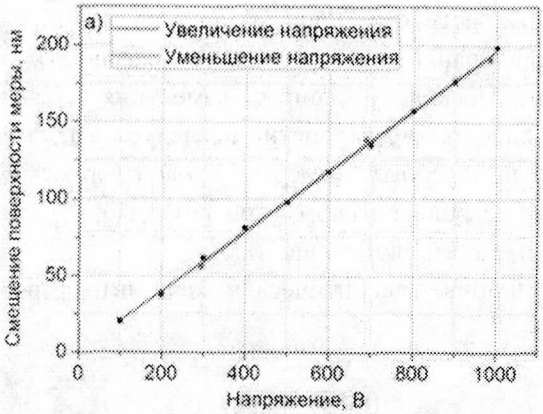


Рис. 8. Зависимость перемещения поверхности двух образцов динамических мер от приложенного напряжения

Полученные результаты позволили подтвердить метрологические достоинства данных мер и возможность их использования для поверки СЗМ.

Разработанный метрологический СЗМ был включен в состав Государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров шероховатости Rmax, Rz, Ra (ГЭТ 113-2014) [8].

**Четвертая глава** посвящена описанию разработки трехкоординатного гетеродинного лазерного интерферометра, встраиваемого в серийно выпускаемые нанотвердомеры и позволяющего измерять функции наконечников зондов нанотвердомеров.

Измерение твердости на нанометровом масштабе линейных размеров чрезвычайно актуально при исследовании тонких пленок и покрытий, а также при изучении свойств отдельных фазовых и структурных составляющих различных сплавов. При проведении исследования характеристик материалов методами индентирования (вдавливания наконечника известной формы в материал) геометрия наконечника нанотвердомера подвержена

изменению. В частности, происходит округление (затупление) кончика, стачивание ребер, могут возникать сколы и выщерблины. Поскольку данные изменения сказываются на результатах расчета характеристик исследуемого материала, для проведения достоверных измерений нанотвердости требуется обеспечение метрологического контроля формы наконечника индентора с нанометровой точностью.

На рис. 9 приведена оптическая схема интерферометра.

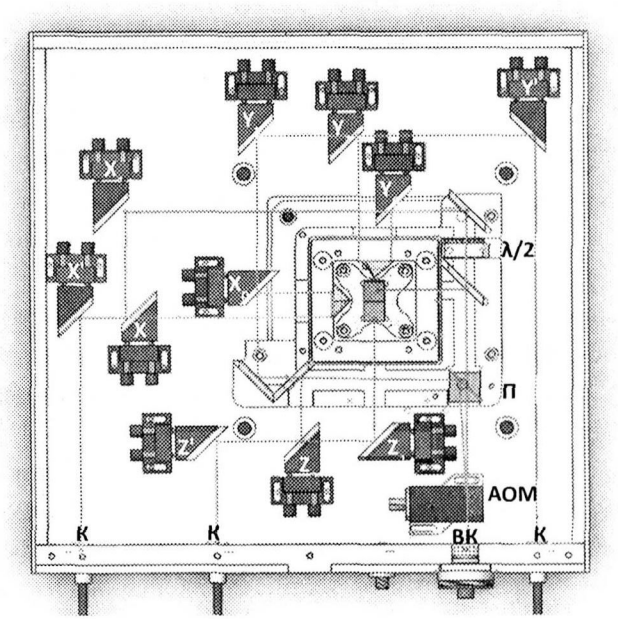


Рис. 9. Оптическая схема интерферометра: К – оптоволоконные коллиматоры, ВК – ввод оптоволоконного кабеля от лазера, АОМ – акустооптический модулятор, П – поляризационный светоделитель, λ/2 – полуволновая пластинка

В представленной схеме источник лазерного излучения был вынесен за пределы оптического блока. Ввод излучения в интерферометр осуществляется с помощью специально

разработанной оптоволоконной системы транспортировки линейно поляризованного лазерного излучения.

Использование поляризационного светоделителя *П* для пространственного разделения опорного и измерительного лучей позволило решить проблему минимизации габаритов оптической схемы интерферометра.

Специально разработанная конструкция крепления триппель призм (рис. 10) позволяет довести ошибку Аббе для оси Z до уровня $10^{-2}$ нм/мкм. Поскольку излучение в триппель призму оси Z попадает, проходя предварительно два уголковых отражателя, расположенных над призмой, происходит поворот плоскости поляризации луча (рис. 10). Поэтому полуволновая фазовая пластинка ($\lambda/2$) расположена после ответвления измерительного луча оси Z.

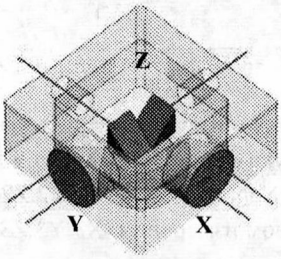


Рис. 10. Схема расположения триппель призм в держателе

Поскольку один из основных источников тепла был удален за пределы термоизолирующего бокса, а размеры оптического блока уменьшены, величины неопределенностей, связанных с температурными флуктуациями, в данном интерферометре являются наименьшими, во всем временном диапазоне (рис. 11).

Компактность оптического модуля интерферометра позволяет размещать его непосредственно в нанотвердомере, индентор которого исследуется, и соответственно исключить ошибку, связанную с изменением угла наклона наконечника при перестановке.

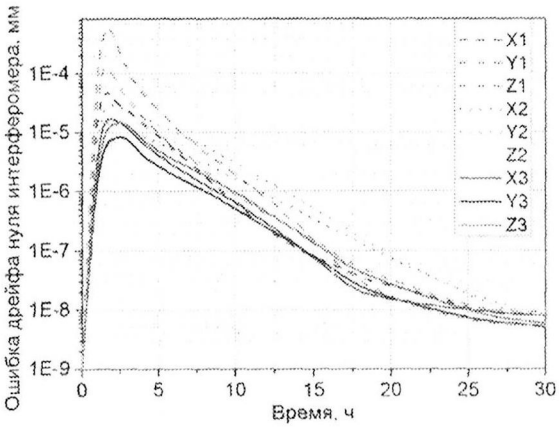


Рис. 11. Зависимость ошибки дрейфа нуля интерферометра из-за изменения показателя преломления воздуха от времени (X1,Y1,Z1-измерительные каналы интерферометра NanoScan 3Di, X2, Y2,Z2-интерферометра с расширенным диапазоном измерений, X3,Y3,Z3 – интерферометра с оптоволоконным вводом излучения)

Функцию поверхности наконечника зонда можно определить исходя из данных, полученных в результате сканирования как тестовой структурой TGT, так и TGZ. В данном случае функции поверхности наконечников были рассчитаны на основании данных, полученных при сканировании наконечников зондов решеткой TGT (рис. 12), методом триангуляции. Использование для этой процедуры решеток TGT объясняется независимостью получаемого результата от ориентации тестовой решетки и возможностью использовать статистическое усреднение по множеству полученных изображений.

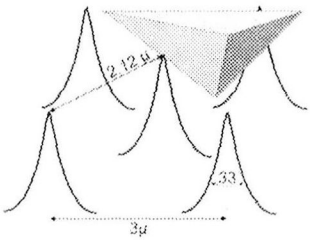


Рис. 12. Схема тестовой структуры TGT

Для измерения радиуса закругления кончика и углов при вершине использовались

тестовые структуры TGZ-типа, поскольку только для данного типа мер точно определена форма элементов структуры решетки, а для расчета указанных параметров необходима точная информация об углах между гранью пирамиды и гранью решетки.

С помощью разработанного интерферометра было проведено исследование наконечников зондов нанотвердомеров, при сканировании тестовой структурой TGT. На рис. 13 представлен результат сканирования тестовой структурой TGT одного из наконечников. Наконечник №1 продолжительное время использовался для наноиндентирования; наконечники №2 и №3 не были в эксплуатации.

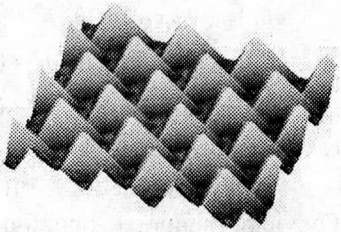

Рис. 13. Изображения, полученные в результате сканирования наконечников зондов тестовой структурой TGT

По результатам сканирования были рассчитаны функции площади поверхности наконечников (рис. 14).

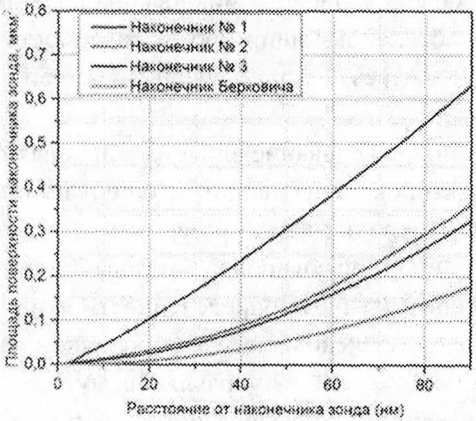


Рис. 14. График зависимости площади поверхности наконечников зондов от высоты

Как видно из представленных на рис. 14 зависимостей, функции площади поверхности представленных зондов отличаются от теоретической функции пирамиды Берковича.

Представленные на рис. 12 зависимости могут быть аппроксимированы функциями:

$A(h) = (19{,}3 \pm 0{,}2) \times 10^{-6} h^2 + (54{,}3 \pm 0{,}2) \times 10^{-4} h$ – наконечник №1,

$A(h) = (35{,}9 \pm 0{,}2) \times 10^{-6} h^2 + (8{,}0 \pm 0{,}2) \times 10^{-4} h$ – наконечник №2,

$A(h) = (32{,}8 \pm 0{,}1) \times 10^{-6} h^2 + (6{,}9 \pm 0{,}1) \times 10^{-4} h$ – наконечник №3,

где $h$ — расстояние от вершины наконечника зонда.

Разработанный интерферометр вошел в состав Государственного первичного эталона твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования (ГЭТ 211-2014) [9].

**Заключение**

Основные результаты данной работы сводятся к следующему.

1. Разработан трехкоординатный гетеродинный лазерный интерферометр, позволяющий проводить измерения перемещений сканера зондового микроскопа с субнанометровым разрешением и обеспечивающий прослеживаемость измерений к эталону метра через длину волны стабилизированного He-Ne-лазера.

2. Проведено исследование влияния основных физических и технических факторов, приводящих к ошибкам при измерении перемещений гетеродинным лазерным интерферометром. Предложенные и реализованные методы минимизации их влияния позволили достичь неопределенности измерений 0,2 нм.

3. Проведены исследования калибровочной зависимости и чувствительности к управляющему напряжению монокристаллических динамических мер вертикального смещения в нанометровом диапазоне с помощью сканирующего

зондового микроскопа, оснащенного лазерным интерферометром, позволившие подтвердить метрологические характеристики данных мер и возможность их использования для поверки СЗМ.

4. Разработан трехкоординатный интерферометр с оптоволоконной системой транспортировки линейно поляризованного лазерного излучения к оптическому блоку, позволяющий измерять функции наконечников зондов нанотвердомеров с нанометровой точностью.

5. Проведены исследования геометрических параметров и определены функции поверхности наконечников зондов нанотвердомеров с помощью метрологического АСМ, оснащенного лазерным интерферометром.

**Список использованной литературы:**

1. Дарзнек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений // Труды Института общей физики им. А. М. Прохорова. 2006. Т. 62. С. 14–37

2.Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии // Метрология, стандартизация и контроль нанотехнологий. 2007. Т. 2. С. 61–69.

3. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии, Нижний Новгород: РАН Институт физики микроструктур, 2004

4. S. Mekid Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment. CRC Press.

5. Руководство по эксплуатации мера периода и высоты линейная (TGZ1, TGZ2, TGZ3) № 3932-013-40349675-2009 РЭ ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМС»

6. Dai G. et al., Metrological large range scanning probe microscope// Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 76, №. 4, pp. 962–969.

7. Luskinovich P., Zhabotinskiy V. Nanomanipulators with Reduced Hysteresis and Interferometers Build in NanoFabs // Sensors & Transducers. 2013. Vol. 159. Issue 11. pp. 369-373.

8. Милованова Е.А., Табачникова Н.А., Лысенко В.Г., Золотаревский С.Ю. Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений параметров шероховатости Rmax, Rz и Ra (ГЭТ 113-2014) // Законодательная и прикладная метрология. 2016. №1, с. 3-6

9. Асланян А. Э., Асланян Э. Г., Гаврилкин С. М., Дойников А. С., Темницкий И. Н., Щипунов А. Н. Государственный первичный эталон твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования ГЭТ 211 –2014 // Измерительная техника. 2016. № 6. С. 3-6.

**Публикации, содержащие результаты диссертации, входящие в список ВАК РФ:**

1. Kazieva T. V., Kuznetsov A. P., Gubskiy K. L., and Reshetov V. N. Three-coordinate laser heterodyne interferometer for metrological assurance of scanning probe microscopes Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9442. pp. 94420K. (Scopus и Web of Science).

2. Kuznetsov A. P., Alexandrova A. S., Buzhinsky O. I., Gubskiy K. L., Kazieva T. V., Savchenkov A. V., Tugarinov S. N. Fiber laser cleaning of metal mirror surfaces for optical diagnostic systems of the ITER // Physics of Atomic Nuclei. 2015. Vol. 78. pp. 1155-1163. (Scopus и Web of Science)

3. Казиева Т. В., Кузнецов А. П., Решетов В. Н., Губский К. Л. Разработка трехкоординатного гетеродинного лазерного интерферометра для метрологического обеспечения сканирующих зондовых микроскопов //Физическое образование в вузах. 2015. Т. 21, № 1С. С. 52.

4. Kuznetsov A. P., Gubskiy K. L, Kazieva T. V., Maslenikov I. I., Reshetov V. N. Heterodyne interferometer for the

metrological assurance of the devices measuring physical properties of nanostructured materials//ELSEVIER Physics Procedia. 2015. Vol. 72. pp. 189-193. (Scopus)

5. Useinov A.S., Kravchuk K.S., Rusakov A.A., Kazieva T.V., Krasnogorov I.V., Kuznetsov A.P. Indenter shape characterization for the nanoindentation measurement of nanostructured and other types of materials//ELSEVIER Physics Procedia. 2015. Vol. 72. pp. 194-198. (Scopus)

6. Kazieva T V, Kuznetsov A P, Ponarina M V, Gubskiy K L, and Reshetov V N SPM metrological assurance using a heterodyne interferometer // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9636. pp. 96360R. (Scopus и Web of Science)

7. Kazieva T. V., Kuznetsov A. P., Ponarina M. V., Gubskiy K. L., and Reshetov V. N. Metrological characterization of nm-range dynamic etalons using a heterodyne interferometer // Journal of Physics: Conference Series. 2016. 747 Vol. 747, Issue 1. pp. 012059. 1-6. (индексируется в Scopus и Web of Science)

8. Казиева Т. В., Кузнецов А. П., Губский К. Л., Понарина М. В., Решетов В. Н. Определение формы инденторов нанотвердомеров интерферометрическим способом // Письма в ЖТФ, 2017, том 43, вып. 3. С. 15-28. (Перевод Applied Physics Letters) (Scopus и Web of Science).

9. Кузнецов А. П., Губский К. Л., Казиева Т. В. Патент на изобретение № 2587686 от 27.05.2016 «Интерферометр для измерения линейных перемещений сканера зондового микроскопа».

Подписано в печать 10.04.2017. Формат 60x84 1/16
Печ.л. 1,75. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31