

**Резюме проекта (НИР, ОКР/ОТР), выполняемого/выполненного
в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-
технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»
по этапу № 4 / итоговое**

Номер контракта: 11.519.11.3002 с дополнительным соглашением от 06.03.2012 №1

Тема: Адаптивные сверхчувствительные измерительные системы для нанометрологии на основе физических принципов, разрабатываемых совместно с Университетом Восточной Финляндии

Приоритетное направление: Индустрия наносистем и материалов

Критическая технология: Нанотехнологии и наноматериалы

Период выполнения: 18 августа 2011 г. – 17 мая 2013 г.

Плановое финансирование проекта: 19,04 млн. руб.

Бюджетные средства - 9,52 млн. руб.,

Внебюджетные средства - 9,52 млн. руб.

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

Ключевые слова: адаптивный интерферометр, нанометрология, динамическая голограмма, фоторефрактивный кристалл, ортогональное многоволновое взаимодействие

1. Цель исследования, разработки

1.1. Проект направлен на создание новых сверхчувствительных, высокоточных адаптивных измерительных систем нанометрологии.

1.2. Целью выполнения НИР является разработка принципов создания сверхчувствительных, высокоточных адаптивных измерительных систем на основе использования динамических фоторефрактивных голограмм для решения практических задач нанометрологии, связанных с регистрацией и измерением сверхмалых физических параметров, характеризующих состояние элементов, систем и устройств объектов нанопромышленности в процессе их создания и эксплуатации. Конечным продуктом, создаваемым с использованием результатов проекта, является физические принципы и схемы организации адаптивных поляризационно-независимых интерферометрических систем регистрации и измерения динамических наномасштабных перемещений, колебаний (в т.ч. колебаний микрообъектов), параметров слабых вибрационных и силовых полей, сверхмалых масс. Роль проекта в решении вышеуказанной задачи (п.1.1), заключается в том, что его результаты закладывают фундамент в построение указанных систем, а также определяют пути их практической реализации.

Работы выполняются в сотрудничестве с коллективом лаборатории Оптических сенсорных технологий Департамента прикладной физики (ДПФ) Университета Восточной Финляндии (УВФ) в рамках Соглашения между ИАПУ ДВО РАН и ДПФ УВФ от 24.06.2011, а также Соглашения между ИАПУ ДВО РАН и УВФ от 01.06.2011.

2. Основные результаты проекта

1) По работам четвертого этапа получены следующие результаты:

Проведена дополнительная серия экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра. Исследована работа адаптивного интерферометра при взаимодействии объектных и опорных волн с разным состоянием поляризации, задаваемыми при помощи четверть волновых пластинок, в схемах двухволнового (2D) и трехволнового (3D) ортогональных взаимодействий. Экспериментально показано, что переход от схемы 2D взаимодействия к 3D, позволяет существенно снизить флуктуации амплитуды сигнала демодуляции вызванные изменением поляризационного состояния объектной волны. Установлено, что оптимальным между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью второй четверть-волновой пластинки при этом является угол в 84° , при котором режим работы адаптивного интерферометра приближается к поляризационно-независимому: флуктуации сигнала демодуляции снижаются до 18% (минимальное значение глубины модуляции выходного сигнала 2,8%, максимальное – 3,4%).

Проведены эксперименты, направленные на изучение работы систем на основе адаптивных поляризационно-независимых интерферометров при малых интенсивностях излучения опорных

и объектного пучков, которые позволяют достичь «щадящего» режима работы системы по отношению к исследуемому объекту и уменьшают энергопотребление всей системы в целом. Установлено, что уменьшение мощности входного излучения в 10 раз сопровождается снижением демодуляционного сигнала всего в 2 раза. При этом работоспособность системы сохраняется вплоть до снижения интенсивности объектного пучка до уровня, равного пределу чувствительности фотоприемника.

В разработанной многоканальной адаптивной интерферометрической измерительной системе (МАИИС) исследовано влияние соотношения интенсивностей опорных и сигнальных световых пучков на уровень чувствительности в отдельно взятом канале при разном количестве одновременно включенных каналов. Установлено, что включение дополнительных работающих каналов не оказывает заметного влияния на работу отдельно взятого канала. При этом оптимальное соотношение интенсивностей, при котором достигается минимальный порог детектирования (18 ± 3), составило 0,15.

Выполнено численное моделирование работы сенсорной части МАИИС. Сравнение результатов численного моделирования с томографическим восстановлением на основе экспериментальных данных, полученных ранее с помощью МАИИС, а также с учетом расчета формы колебаний упругой мембраны позволяют заключить, что сенсорная часть МАИИС точно повторяет форму колебаний исследуемой мембраны, тем самым обеспечивая достоверное томографическое восстановление распределения ее поперечных колебаний. Таким образом, МАИИС может успешно применяться в задачах мониторинга слабых вибрационных полей.

Совместно с финскими партнерами проведена оптимизация схемы поляризационно-независимого адаптивного интерферометра с целью снижения затрат на его изготовление. Установлено, что оптимизацию можно осуществить за счет уменьшения размеров оптомеханических элементов систем; перехода от использования юстируемых оправ для оптических элементов к неюстируемым; использования источников лазерного излучения меньшей мощности; уменьшения размеров ФРК. Показано, что проведение оптимизации позволяет снизить стоимость разработанных измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра на 54%.

Совместно с финскими партнерами выполнен обзор научно-информационных источников и сделан анализ международного и российского рынков, которые показали, что среди измерительных систем для регистрации сверхмалых масс, наномасштабных перемещений, колебаний и вибраций, а также слабых вибрационных и электрических полей прямых аналогов разработанных в настоящей НИР систем в России и в мире нет. Показано, что проектные технологии создания приборов на основе поляризационно-независимых адаптивных интерферометров для исследований нанопроцессов является конкурентоспособными на современном рынке аналитического оборудования.

Совместно с финскими партнерами выработаны рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, предназначенного решения практических задач нанометрологии.

2) Основные характеристики созданной продукции:

Общие характеристики адаптивной измерительной системы (АИС) на основе ПН адаптивного интерферометра:

- относительный порог детектирования одноканального АИС на основе ортогонального трехволнового взаимодействия: не более 14;
- ориентировочная стоимость: 421600 руб.

Характеристики АИС регистрации наномасштабных перемещений и колебаний микро- и макрообъектов:

- порог детектирования наномасштабных перемещений микро- и макрообъектов в области низких/средних/высоких скоростей перемещений: 1,9 / 1,7 / 1,6 нм;
- динамический диапазон: 42 дБ;
- порог детектирования наномасштабных колебаний микро- и макрообъектов: $1,8 \times 10^{-7} \text{ нм}(\text{Вт/Гц})^{1/2}$;

Характеристики многоканальной АИС регистрации параметров слабых динамических полей:

- количество реализованных каналов: 26;
- перекрестные помехи между каналами: до -38 дБ.
- чувствительность, эквивалентная порогу детектирования перемещений поверхности, на один канал: $(0,97 \pm 0,3) \times 10^{-6} \text{ нм}(\text{Вт/Гц})^{1/2}$
- диапазон амплитуд регистрируемых поперечных колебаний: 2,2 – 110 мкм.

- пространственное разрешение $1,3 \text{ см}^{-1}$.

Характеристики АИС измерения сверхмалых масс микро- и нанообъектов:

- чувствительность: $1,7 \times 10^{12} \text{ Гц/г}$

- порог детектирования массы: $8,5 \times 10^{-12} \text{ г}$ (для микрокантилевера $170 \times 42 \times 11,5 \text{ мкм}^3$); $1,0 \times 10^{-16} \text{ г}$ (для микрокантилевера $20 \times 0,3 \times 0,3 \text{ мкм}^3$).

Характеристики АИС измерения слабых электрических и магнитных полей:

- чувствительность к магнитному полю: $0,28 \text{ дБ/мкТл}$

- динамический диапазон измерения: 11 дБ

- порог детектирования электрического тока: 30 мкА .

- порог детектирования магнитного поля: $5,33 \text{ мкТл}$.

3) Новизна научных решений заключается в использовании новой геометрии трехволнового ортогонального взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии, открывающей возможность создания полностью поляризационно-независимых схем адаптивных интерферометрических измерительных систем; в комбинировании принципов адаптивной интерферометрии и резонансного микровзвешивания, открывающем перспективы кардинального снижения порога детектирования массы микро- и нанообъектов.

4) В отличие от разрабатываемых в настоящем проекте схем существующие к настоящему времени системы измерения параметров магнитных и электрических полей, а также сверхмалых масс не являются адаптивными.

3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках исследования, разработки

В ходе четвертого этапа НИР поданы две заявки на получение патентов на полезную модель:

1) Адаптивный регистратор малых перемещений. Входящий № 025192, № регистрации 2013117028, дата поступления 12.04.2013.

2) Адаптивный волоконно-оптический микрофон. Входящий № 025191, № регистрации 2013117027, дата поступления 12.04.2013.

4. Назначение и область применения результатов проекта

Полученные результаты могут быть использованы для создания систем контроля параметров/состояния микро- и нано-электромеханических систем (MEMS / NEMS), систем контроля параметров/состояния макромасштабных объектов с субнанометровым разрешением, детекторов наномасштабных объектов, детекторов сверхслабых динамических физических величин и полей, в т.ч. характеризующихся кратким проявлением на длительных временных интервалах (ждущие детекторы), детекторов сверхслабых физических полей (в т.ч. акустических, гидроакустических, электрических, магнитных, гравитационных), систем высокоразрешающего лазерно-ультразвукового исследования структуры технических и биологических объектов, а также медицинских исследованиях.

Внедрение результатов позволит модернизировать существующие методы и подходы проведения нанометрологических исследований, а также открыть новые области применения высокоточных прецизионных измерительных систем, расширив тем самым рынок высокотехнологичного научного оборудования, а также услуг, связанных с его производством и внедрением.

5. Эффекты от внедрения результатов проекта

Создание предпосылок для появления конкурентно-способных образцов высокотехнологического оборудования. Повышение престижа и уровня Российской науки. Закрепление научных кадров на территории РФ.

6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта

Коммерциализация проектом не предусмотрена

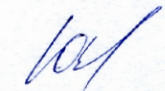
Директор
Института автоматизации и процессов
управления ДВО РАН, академик

Руководитель работ - руководитель отдела
оптоэлектронных методов исследования га-
зообразных и конденсированных сред,
академик


М.П.

11.519.11.3002 - 14 (Резюме проекта) 4-й этап -14





Ю. Н. Кульчин



Ю. Н. Кульчин