В диссертационный совет 24.1.029.01

на базе ИАП РАН

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора физико-математических наук, профессора РАН Баимовой Юлии Айдаровны на диссертационную работу Надоян Ирины Валерьевны «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискеров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы.

В последние годы наблюдается тенденция к созданию всё более миниатюрных и эффективных приборов на основе микро- и наноструктур. Это привело к возникновению нового класса высокочувствительных сенсоров, которые обладают значительным коммерческим потенциалом и могут быть использованы в самых различных областях — от анализа химического состава веществ до измерения инерционной массы и сверхмалых сил. Особое внимание уделяется наноэлектромеханическим и нанооптомеханическим системам (НЭМС и НОМС). Указанные устройства демонстрируют высокую чувствительность к внешним воздействиям, способную уловить изменения с точностью до одного атома и сил порядка пиконьютонов. Такая чувствительность позволяет проводить уникальные фундаментальные исследования процессов на молекулярном и атомарном уровнях, что открывает новые горизонты для наномеханических, химических и биологических приложений. Современные методы обнаружения малых инерционных масс и сверхмалых сил с использованием НЭМС и НОМС опираются на высокоточные измерения изменений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) наномеханического резонатора (НМР), который служит ключевым элементом этих систем. Для измерения механических параметров НМР применяются сложные оптические, механические или электронные системы детектирования. Они могут быть интегрированы на одной подложке с НМР и ёмкостной или магнитодвижущей системой механической раскачки, либо вынесены во внешнюю экспериментальную установку. Применение таких методов требует проведения измерений при сверхнизких температурах, которые достигаются с помощью современных

технологий охлаждения, таких как рефрижераторы, лазерные методики и другие. Однако, несмотря на высокую чувствительность, описанные системы сложны в изготовлении, а их реализация требует сложных экспериментальных установок. В данной работе предлагается альтернативный метод определения механических характеристик НМР, основанный на визуализации колебаний НМР in situ с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). В рамках данного метода, АЧХ определяется на основе анализа видеоряда, на котором визуализируется процесс колебаний при подаче синусоидального сигнала с разверткой по частоте от внешнего генератора на систему механической раскачки. Анализ видео и графическое построение АЧХ могут осуществляться автоматически с помощью специализированного программного обеспечения, основанного на технологии машинного зрения. Исследуемые нанообъекты можно размещать на НМР с применением встраиваемого микроманипулятора и повторно измерять АЧХ непосредственно в камере СЭМ. Наблюдение формы колебаний вискера во время детектирования позволяет изучать не только изменение резонансной частоты, но и изменения формы колебаний на высших гармониках, что особенно важно для исследований, проводимых в рамках данной диссертации.

На ряду с альтернативными методами исследования продемонстрирован новый тип НМР на основе одиночных углеродных нановискеров (УНВ), обладающих малой массой и высокими резонансными частотами в мегагерцовом диапазоне. Такой детектор изготавливается с применением метода осаждения материала под действием фокусированного электронного пучка из остаточной атмосферы камеры микроскопа (FEBID – focused electronbeam-induced deposition). Технология FEBID универсальна и позволяет изготавливать аморфные структуры заданной геометрической формы. Чтобы изготовить УНВ, необходимы лишь СЭМ и установка электрохимического травления. Исследуемый в работе детектор масс и сверхмалых сил обладает высокой чувствительностью и не требует использования методов фотолитографии, эпитаксии и напыления для создания НМР. Это значительно снижает его стоимость и открывает возможности для применения в экспресс-диагностике.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 137 страниц печатного текста и содержит 61 рисунок, 3 таблицы и список литературы из 163 источников.

Во введении описана актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, практическая значимость и представлена апробация результатов. Также представлены положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора и указано общее число публикаций по теме диссертации.

В **первой главе** приведен литературный обзор по теме диссертации. Представлена краткая история исследований, посвященных типам наномеханических резонаторов, отмечаются его особенности и свойства. В

обзоре представлены основные методы формирования микро- и наноструктур с высоким аспектным отношением длины к диаметру. Описаны механические параметры одномерных наноструктур, методы измерения резонансных характеристик НМР, основные виды детекторов масс микро- и нанообъектов, а также структуры для исследования оптомеханических эффектов.

Вторая глава посвящена описанию технологических и экспериментальных методик, используемых в ходе проведённых исследований. Приведены описания экспериментальных установок, их особенностей.

В **третьей главе** данной работы предлагается метод отслеживания положения точки перетяжки второй гармоники при определении массы нанообъектов. Такой подход направлен на более точное измерение массы наноструктур по сравнению с методикой определения массы по сдвигу резонансной частоты вискера, так как не требует длительного измерения АЧХ в СЭМ, которое приводит к обрастанию вискера паразитным углеродным слоем под действием электронного пучка, что влияет на точность детектирования массы. Также в работе для повышения чувствительности детекторов масс рассматривается модель двусоставного осцилятора для подбора наилучшей геометрии углеродного вискера при измерениях.

В **четвертой главе** рассматривается модуляция колебательных параметров НМР на основе УНВ, который вводится в перетяжку гауссова пучка лазерного излучения. Такая геометрия удобна для сенсорных приложений, поскольку указанный одномерный наноструктурный объект обладает высокой механической прочностью, высоким значением добротности, а его резонансную частоту можно регулировать в широком диапазоне частот. Кроме того, оптомеханические свойства НМР могут быть улучшены за счет помещения на свободный конец вискера металлической или диэлектрической наночастицы, что важно для приложений масс-детектирования. Предлагается использование НОМС, состоящей из УНВ с локализованной Si наночастицей, для улучшения лазерной модуляции механических колебаний системы. Недавно Si наночастицы были предложены в качестве эффективных преобразователей света в тепло с оптическим поглощением, усиленным за счет резонансов Ми. При взаимодействии такой НОМС с лазерным излучением существенно изменяются резонансные свойства НМР ввиду нагрева, оптического давления и оптических сил. Понимание оптически индуцированных эффектов в НОМС необходимо для разработки наноразмерных оптомеханических, химических и биологических сенсоров. Термооптические эффекты в полупроводниковых нанофотонных структурах открывают уникальные возможности полностью оптического управления одиночными рассеивателями, системами метарешеток, модуляции генерации второй гармоники, достижения режимов бистабильности и невзаимности.

В **Заключении** приведены основные выводы по диссертации.

Научная новизна и практическая значимость исследований. К результатам, полученным в диссертации И. В. Надоян, которые обладают наибольшей научной новизной, можно отнести:

1. Разработана теоретическая модель, описывающая режимы колебаний наномеханической системы на основе составных вискеров различного размера в диапазоне диаметров до 500 нм и длин до 5 мкм. Показано, что при определенном выборе размеров вискеров в системе возможно возникновение механического резонанса Фано с резким профилем амплитудно-частотной характеристики. Рассмотрена конструкция составной кантилеверной резонансной системы, на основе двух вискеров, расположенных друг на друге, позволяющая увеличить точность измерения массы резонансным методом, по сравнению с резонаторами на основе одиночных вискеров.
2. Экспериментально продемонстрировано возбуждение первой и второй резонансных частот УНВ диаметром порядка 150 нм и длиной порядка 5 мкм. Показано, что добавление массы на свободном конце УНВ, представляющего собой резонатор кантилеверного типа, приводит к сдвигу резонансных частот, а также детектируемому изменению положения точки перетяжки на второй резонансной частоте.
3. Экспериментально показано, что чувствительность детекторов масс кантилеверного типа на основе УНВ диаметром порядка 150 нм и длиной порядка 5 мкм составляет единицы фг.
4. Впервые предложена экспериментальная методика по определению фокусного расстояния линзированного волокна за счет анализа амплутиды коллебаний углеродного нанорезонатора при расположении его в фокусе линзы.
5. Впервые предложена теоретическая модель, описывающая колебания резонатора кантилеверного типа на основе одиночного УНВ, находящегося в фокусе лазерного пучка. Показано, что модуляция температуры вискера, связанная с последовательным входом и выходом резонатора из области фокусировки лазерного пучка, приводит к модуляции значения модуля Юнга вискера (и как следствие жесткости), что в свою очередь обеспечивает возникновение в системе параметрического резонанса.
6. Впервые экспериментально показано, что локализация оптической наноантенны, спектральное положение резонанса Ми которой совпадает с длиной волны внешнего лазерного излучения, на свободной вершине нанорезонатора приводит к увеличению глубины модуляции колебаний в фокусе лазерного пучка.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректной постановкой цели и задач исследования, использованием современных экспериментальных и технологических методов. Представленные численные и экспериментальные результаты согласуются с результатами, полученными в других научных группах, не

противоречат существующим научным представлениям и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы, полученные соискателем лично или в соавторстве, опубликованы в 9 статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендуемых ВАК, а также индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Замечания по работе.

1. В главе 2 на страницах 66 - 72 описана схема ввода оптического излучения, но не приведено обсуждение вопроса критериев подбора оптического линзированного волокна;
2. В главе 3 на странице 74 для описания колебаний углеродных вискеров предлагается использовать теорию Эйлера-Бернулли, которая подходит для малых изгибных деформаций линейно-упругих балок, однако на СЭМ изображениях видно, что колебания вискера не относятся к малым;
3. В главе 3 на странице 81 в формуле по определению массы по смещению точки перетяжки второго резонанса приведена формула, отражающая взаимосвязь между точкой перетяжки до добавления массы (z_0) и длиной вискера (L): $z_0 = 0{,}78 \cdot L$, при этом, не сказано откуда взято значение 0,78;
4. В главе 4 на странице 102 в качестве наноантены для детектирования оптимеханических эффектов предлагается использовать углеродный вискер с локализованной Si частичкой, однако, не приводится описание почему в качестве материала частицы выбран именно кремний.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации И. В. Надоян.

Общее заключение. Диссертация И. В. Надоян является законченной научно-квалификационной работой и представляет собой исследование, выполненное на высоком научно-технологическом уровне. Содержание и результаты исследований изложены четко и понятно. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание, основные результаты, научные положения и выводы. Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие методов формирования УНВ, а также создания на их основе детекторов массы и сенсоров оптомеханических эффектов. По своей теме и содержанию диссертация полностью соответствует специальности 1.3.2. — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Считаю, что диссертация И. В. Надоян «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискеров» соответствует всем критериям, установленным в пунктах 9, 10, 11, 13 раздела II «Положения о присуждении

ученых степеней» от 24.09.2013 года № 842 с учетом изменений и дополнений на 2024 г. и предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертант, Надоян Ирина Валерьевна, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук
по научной специальности 01.04.07 –
физика конденсированного состояния,
профессор РАН, заведующая лабораторией
Физика и механика углеродных наноматериалов,
ФГБУН Институт проблем
сверхпластичности металлов РАН
Тел.: (812) 234−31−60;
E-mail: Julia.a.baimova@gmail.com

Баимова Юлия Айдаровна
12.11.2024

ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН», Россия, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39, тел: (347) 223-64-07, факс: (347) 282-37-59, e-mail: imsp@imsp.ru

Подпись Баимовой Ю.А. удостоверяю.