ОТЗЫВ

официального оппонента
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

Представленная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию механических колебаний углеродных нановискеров. Данная задача представляет большой интерес с точки зрения развития нанотехнологий, в частности в контексте разработки ультрачувствительных сенсоров, которые могут найти применение в различных отраслях науки и техники, например, в оптике или химии.

В работе Ирины Надоян разработаны методики измерения масс наночастиц и определения параметров лазерного луча по их воздействию на колебания углеродного нановискера, один из концов которого жеско закреплен на острие вольфрамовой иглы. Для этого в работе развито необходимое теоретическое описание изгибных колебаний нановискеров, позволяющее связать резонансные частоты собственных мод с параметрами нановискеров. С помощью представленной теории проведена интерпретация полученных экспериментальных результатов и на основе этого предложены методики измерений, позволяющие добиться высокой точности измерений при сравнительной простоте экспериментальной установки.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, трех глав, в которых изложены результаты диссертационного исследования, заключения и списка литературы. Диссертация написана ясным языком, материал диссертации хорошо структурирован и излагается последовательно и достаточно подробно, что существенно упрощает чтение диссертации. Диссертация содержит необходимые иллюстрации, которые, как я с удовольствием отмечаю, хорошо продуманы, выполнены на высоком уровне и снабжены необходимыми пояснениями.

Во введении автором диссертации убедительно обоснована актуальность проводимых исследований и определена цель диссертации. Далее определен ряд научных задач, решение которых было необходимо для достижения заявленной цели. Также во введении содержатся разделы, посвященные личному вкладу автора в получение результатов, вошедших в диссертацию, их новизне и степени достоверности. Введение раскрывает теоретическую и практическую значимость диссертационного исследования и формулирует положения, выносимые на защиту. Необходимая информация об апробации и публикации результатов также содержится в этом разделе диссертации. Кроме этого во введении описана структура диссертации.

Литературный обзор, приведенный в диссертации, достаточно подробный и с необходимой полнотой раскрывает современное состояние технологии изготовления, методики измерения различных характеристик и теоретические аспекты динамики нанопроволок. Сделанный в диссертации литературный обзор позволяет хорошо понять,

какое место занимают задачи, рассмотренные соискателем, в контексте современных исследований.

В начале второй главы диссертации дано описания методам изготовления углеродных наноструктур (выращивания углеродных кантеливеров на специально изготовленных вольфрамовых иглах). Далее в этой главе диссертации описываются способы возбужения изгибных колебаний углеродных вискеров и снятия их амплитудно-частотных характеристик, в том числе описана методика визуализации колебаний кантеливера с помощью сканирующего электронного микроскопа. Также в этой главе описана технология переноса наночастиц на конец углеродного вискера и способы интеграции оптоволокна, подводящего лазерное излучение с камерой сканирующего туннельного микроскопа.

Третья глава посвящена определению масс наночастиц, размещенных на нановискере, по изменинию амплитудно-частотной харакетристики его изгибных колебаний. Автором диссертации получены решения для линейных изгибных колебаний кантеливера, позволяющие определить зависимость резонансных частот и формы колебаний кантеливера как функции его параметров (геометрических параметов, модуля Юнга, массы закрепленной на кантеливере наночастицы и т. д.). Полученные формулы позволяют определить массу, закрепленную на конце нановискера как по изменению резонансной частоты, так и по изменению положения узла («перетяжки») второй колебательной моды. Затем в диссертации приводятся экспериментальные данные и вычисляются массы закрепленных на нановискере частиц по выведенным в диссертации формулам и исходя из измеренных геометрических характеристик наночастиц. В диссертации проводится сравнение этих методов и делается вывод, что масса частицы, найденная по изменению положения узла второй моды, лучше совпадает с массой, определённой по геометрических характеристикам, чем масса, найденная из сдвига резонансной частоты.

В этой же главе теоретически и экспериментально рассмотрены колебания вискеров, состоящих из двух частей разных длин и диаметров. Автор диссертации обобщил теоретические результаты на этот случай и провел сравнение с экспериментальными данными. Теоретический анализ позволил составить карты чуствительности геометрического положения узла колебаний как функции диаметров первого и второго сегментов составного вискера. Это позволило провести оптимизацию чувствительности метода путем подбора диаметров первой и второй частей нановискера. Экспериментальные результаты подтвердили правильность теоретических выводов и позволили улучшить чувствительность системы к массам, размещенным на нановискере.

Оптомеханические явления, исследованные соискателем, составляют содержание четвертой главы диссертации. В этой главе рассматриваются колебания углеродного нановискера с кремниевой наночастицей, прикрепленной к его свободному концу. В диссертации проверяются две гипотезы о влиянии сфокусированного лазерного излучения на колебания нановискера. Путем теоретических расчётов оценено световое давление, действующее на вискер, и показано, что для экспериментальных параметров влияние этого эффекта пренебрежимо мало. В то же время эффект нагрева нановискера поглощаемым светом оказывается значительным. Это позволяет определять точку фокусировки (перетяжку) оптического пучка путем сканирования нановискером. Когда нановискер оказывается в точке перетяжки, где интенсивность лазерного излучения

максимальна, его температура увеличивается, что приводит к уменьшению резонансной частоты его изгибных колебаний. Также эффект нагрева приводит к увеличению амплитуды колебаний вискера. В диссертации показано, что не только средняя температура вискера влияет на амплитуду его колебаний, принципиально важным является то, что эта температура периодически зависит от времени, что приводит к дополнительному усилению колебаний.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

В качестве положительных сторон диссертации Ирины Надоян я хотел бы в первую очередь выделить целостность и полноту проведённого исследования, где экспериментальные результаты последовательно сравниваются с теоретическими моделями, описывающими динамику экспериментальных образцов. В диссертации можно выделить часть, посвященную использованной технологии изготовления углеродных нановискеров, часть, посвященную экспериментальному исследованию образцов, и теоретическую часть, необходимую для объяснения обнаруженных эффектов. По моему мнению, все части гармонично объединены между собой логикой единого исследования и выполнены на высоком научном уровне. На мой взгляд, основные результы диссертации можно определить как экспериментальные, но при этом они очень хорошо обоснованы с помощью развитой Ириной Валерьевной теории. Я считаю, что результаты, представленные в диссертации, являются существенным вкладом в развитие нанотехнологий, открывающие в перспективе путь к улучшению чувствительности приборов, позволяющих напрямую измерять массы наночастиц или с высокой точностью детектировать распределение интенсивности оптического излучения.

Тематика диссертационного исследования, научная новизна, основные результаты и положения, вынесенные на защиту, полностью соответствуют паспорту специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики, области знаний – физико-математические науки по следующим пунктам: 2, 6, 8, 10.

Считаю, что все положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы, достоверность представленных результатов не вызывает сомнений. Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в авторитетных научных журналах.

Отмечая высокий научный уровень работы я, тем не менее, считаю необходимым высказать ряд замечаний, носящих, в основном, технический характер.

1. Несмотря на то, что диссертация в целом написана очень хорошим легко читаемым языком, я должен отметить, что считаю не очень удачным решение широко использовать сокращения при написании содержания диссертации, то есть до того, как они введены в тексте.
2. В диссертации представлены очень интересные, на мой взляд, результаты, демонстрирующие изменение частоты колебаний кантеливера при осаждении на нем углерода в процессе сканирования в электронном микроскопе. Однако, можно предполагать, что осаждаемый углерод не только увеличивает массу кантеливера, но также меняет его упругость. Поэтому в этом месте диссертации хотелось бы увидеть больше обсуждений того, как именно осаждаемый углерод меняет форму кантеливера, какова структура осаждаемого углерода и т. д.

3. Автором приводится сравнение экспериментальных результатов с линейной моделью, верной, если амплитуда колебаний вискера достаточно мала. Мне кажется, что необходимо отметить, насколько хорошо предположение о линейности колебаний отвечает реальным экспериментальным условиям.
4. В четвертой главе диссертации обсуждается влияние оптического нагрева кантеливера на его динамику. Путем численного расчета автор диссертации определила стационарное распределение температуры в вискере. Возникает вопрос, как пространственная неоднородность нагрева вискера влияет на его резонансную частоту.
5. Можно думать, что нагрев вискера влияет не только на частоту колебаний, но и на скорость их затухания. Насколько важна зависимость добротности резонатора от его температуры?
6. Кроме этого я хотел бы отметить, что эффект модуляции резонансной частоты за счет периодического нагрева вискера зависит от характерного времени остывания (времени релаксации температуры), и если это время велико, то изменения температуры при колебаниях вискера будут малы. Оценивалось ли характерное время остывания нановискера и как оно соотносится с периодом колебаний?

Отмеченные выше недостатки носят технический характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Представленная работа удовлетворяет всем критериям, применяемым к кандидатским диссертациям, определенным пунктами 9-14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 25.01.2024) «О порядке присуждения учёных степеней», и ее автор, Надоян Ирина Валерьевна, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

12 ноября 2024 г.

Юлин Алексей Викторович
Официальный оппонент, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 Оптика (физико-математические науки), ведущий научный сотрудник физического факультета Университета ИТМО
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Университет ИТМО
Электронная почта: a.v.yulin@itmo.ru
Сайт организации: http://www.itmo.ru

Подпись Юлина А.В.
удостоверяю
Менеджер ОПС
Пономарева О.В