СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

ул. Профессора Попова, д.5 литера Ф,
Санкт-Петербург, 197022
Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58;
e-mail: info@etu.ru; https://etu.ru
ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381
ИНН/КПП 7813045402/781301001

26.11.2024 № 0086/с-152

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Семёнов Александр
Анатольевич

_____2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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»

1. Актуальность темы диссертационной работы

В последние годы наблюдается тенденция к созданию миниатюрных и эффективных приборов на основе микро- и наноструктур, которые могут быть использованы в различных областях науки — от анализа химического состава веществ до измерения инерционной массы и сверхмалых сил. На сегодняшний день особое внимание привлекают наноэлектромеханические системы (НЭМС), поскольку они обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям, а также обеспечивают детекрирование добавочной массы с точностью до единичного атома и сил порядка пН. Чувствительным элементом таких систем является наномеханический резонатор (НМР), в качестве которого могут выступать кварцевые мембраны, углеродные нанотрубки, кремниевые и нитрид кремниевые нитевидные нанокристаллы, пластины из поликристаллического кремния и нитрида

кремния. Создание указанных НМР сопряжено с необходимостью использования процедур фотолитографии, напыления тонких слоев и плазмо-химического травления, что является трудоемкими и длительными процессами. Современные методы определения величины малых инерционных масс и детектирования сверхмалых сил с использованием НЭМС основаны на высокоточных измерениях изменений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) резонаторов. В настоящее время для измерения механических параметров НЭМС в основном применяются сложные оптические, механические или электронные системы детектирования. Несмотря на продемонстрированную высокую чувствительность, такие системы сложны в производстве, а их реализация требует дорогостоящего экспериментального оборудования для детектирования механических параметров наносистем. Перечисленные недостатки НМР могут быть преодолимы за счет использования в качестве рабочего тела углеродных нановискеров (УНВ), поскольку они обладают уникальными свойствами и множеством преимуществ благодаря своей геометрии и относительно простому методу изготовления. УНВ можно выращивать на вершинах заостренных вольфрамовых проволок в камере сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) с помощью метода осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка. В отличие от других методов создания НМР, изготовление детекторов на основе УНВ требует использования только установки электрохимического травления и СЭМ. УНВ имеют относительно небольшую массу, при этом, их собственная резонансная частота лежит в МГц диапазоне, что обуславливает их высокую чувствительность при детектировании сверхмалых масс и исследовании оптомеханических эффектов. Для определения механических характеристик НМР предлагается использовать метод визуализации колебаний НМР непосредственно в СЭМ. Такой подход не требует дополнительных устройств для детектирования резонансных параметров наноосцилляторов.

Не смотря на уже имеющиеся исследования масс-детекторов на основе углеродных нанотрубок и нановискеров, не было уделено достаточного внимания методике определения массы нанообъектов по отслеживанию смещения точки перетяжки на высших колебательных модах. Предлагаемый подход направлен на повышение чувствительности при измерении массы наноструктур по сравнению с методикой, основанной на отслеживании сдвига резонансной частоты вискера. Хотя применение наноразмерных механических резонаторов в качестве чувствительных элементов детекторов масс является перспективным, вопрос использования составных систем резонаторов более сложной геометрии остаётся

малоизученным. Такие системы при определённой конфигурации позволяют увеличить чувствительность сенсоров масс в разы по сравнению с односоставными системами. Вопрос о применении наномеханических резонаторов на основе УНВ в качестве сенсоров оптомеханических эффектов остаётся также недостаточно изученным. При этом понимание оптически индуцированных эффектов в НЭМС открывает перспективы для разработки нового типа наноразмерных детекторов, обладающих высокой чувствительностью к внешнему облучению.

В этой связи актуальность диссертационной работы И.В. Надоян, посвященной исследованию механических свойств наноразмерных систем на основе УНВ для дальнейшего развития современных детекторов массы и сенсоров оптомеханических эффектов, а также совершенствованию их характеристик, не вызывает сомнений.

2. **Наиболее значимые научные результаты, полученные в диссертации, их новизна и достоверность:**

Экспериментально показано возбуждение первой и второй собственных резонансных гармоник УНВ, при этом добавление массы на свободном конце УНВ приводит к сдвигу резонансных частот, а также детектируемому изменению положения точки перетяжки на второй резонансной частоте;

Разработана теоретическая модель, описывающая режимы механических колебаний составных осцилляторов различной геометрии и возможность возникновения механического резонанса Фано с резким профилем амплитудно-частотной характеристики, что актуально для увеличения чувствительности детекторов массы;

Посредством моделирования разработана модель, описывающая колебания резонатора на основе УНВ, находящегося в фокусе лазерного пучка;

Предложена экспериментальная методика по определению фокусного расстояния линзированного волокна.

3. **Практическая и теоретическая значимость результатов диссертационного исследования**

К наиболее значимым результатам, на наш взгляд, относятся: предложенная конструкция резонатора на основе составных нановискеров, обеспечивающая увеличение чувствительности системы к добавочной массе на свободном конце, а также новый подход к детектированию оптомеханических эффектов с применением УНВ в качестве чувствительного элемента наноразмерных оптомеханических, химических и биологических сенсоров. На базе сканирующего электронного микроскопа создана экспериментальная установка, в вакуумной камере которой

сведены электронный пучок, острие наноманипулятора и фокус оптического волокна, обеспечивающего ввод внешнего лазерного излучения. Также в работе предложена универсальная методика измерения фокусного расстояния линзированного волокна. Теоретическая значимость работы определяется разработанными аналитическими моделями, описывающими режимы колебаний составных вискеров, а также осциллирующего вискера, находящихся в фокусе лазерного пучка.

4. Рекомендации по использованию диссертационной работы

Полученные в ходе выполнения работы результаты уже находят практическое применение и в дальнейшем могут быть востребованы в научных и образовательных центрах, на предприятиях, занимающихся разработкой и производством сенсоров малых масс и оптомеханических эффектов, в том числе в Санкт-Петербургском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном университете им. Петра Великого, Санкт-Петербургском электротехническом университете («ЛЭТИ»), Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете РАН, компаниях ООО «НТ-СПб» (Санкт-Петербург) и ОАО «Авангард» (Санкт-Петербург).

5. Апробация и публикации по теме диссертации.

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 9 публикациях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендуемых ВАК, а также индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Результаты прошли апробацию на Международных и Всероссийских научных конференциях:

1. «Saint Petersburg OPEN 2021» 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. May 25-28, 2021, Saint Petersburg, Russia;
2. XVII Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 13–15 сентября 2022 г., Саратов;
3. «Saint Petersburg OPEN 2023» 10th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures May 23-25, 2023, Saint Petersburg, Russia;
4. “Молодежная Школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024)”. НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ. 11 - 15 марта 2024 года, пос. Лосево, Ленинградская область.

Полученные в работе результаты представляются достоверными, а основные выводы и положения, выносимые на защиту, научно обоснованными. Это обеспечивается корректной постановкой исследовательских и практических задач, применением в работе адекватных им экспериментальных методов, воспроизводимостью экспериментальных результатов, опорой на современные теоретические представления физики, согласованностью опытных и расчетных данных, основанных на анализе разработанных моделей.

6. Замечания по диссертационной работе и автореферату.

По содержанию и оформлению автореферата и диссертации можно сделать ряд замечаний:

1. В работе не отражено, проводилось ли исследование структуры углеродных нановискеров. Остается открытым вопрос, можно ли отжигать углеродные вискеры и как это отразится на их механических свойствах.
2. На сколько сильно влияет паразитная наращенная масса? Какой предел измерения массы с применением углеродных нановискеров?
3. Как влияет точность позиционирования локализованной массы на вершине осциллятора на точность определения ее массы?
4. Не упоминалось, можно ли экспериментально достичь колебаний исследуемых углеродных нановискеров на модах более высоких порядков (после второй)?

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Работа производит очень хорошее впечатление оригинальностью подхода, последовательностью проведения исследований, используемыми методами моделирования и эксперимента, логикой выводов, сделанных на основе полученных результатов.

7. Заключение

Диссертация Надоян Ирины Валерьевны «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискеров» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, тема которой актуальна для науки и практики, а результаты значимы в плане развития методов и приборов экспериментальной физики и её приложений в области сенсоров различного типа. Диссертация соответствует пп. 1-3, 5, 6, 8-10 паспорта специальности 1.3.2. – Приборы и методы

экспериментальной физики (физико-математические науки), требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 с учетом изменений и дополнений на 2024 г., а её автор Надоян Ирина Валерьевна, **заслуживает присуждения степени** кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Доклад по диссертационной работе Надоян Ирины Валерьевны заслушан и обсужден на научном семинаре кафедры микро- и наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»Отзыв обсужден и одобрен единогласно на заседании кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Присутствовало на заседании 43 чел. из 47 чел. Результаты голосования: «за» - 43 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № 13/24 от 26 ноября 2024 г.

Заместитель заведующего
кафедрой Микро- и наноэлектроники
доктор физ.-мат. наук, профессор Зубков Василий Иванович

Почтовый адрес: 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф
Телефон: +7 812 2343164
Адрес электронной почты: vizubkov@etu.ru
Организация – место работы: федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра микро- и наноэлектроники

Секретарь
кафедры Микро- и наноэлектроники
кандидат физ.-мат.наук, доцент Александрова Ольга Анатольевна

Почтовый адрес: 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф
Телефон: +7 812 2343164
Адрес электронной почты: oaaleksandrova@etu.ru
Организация – место работы: федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра микро- и наноэлектроники