



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
Телефон (факс): (812) 297-2145
www.spbau.ru
ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879
ИНН/КПП 7804161723/780401001

УТВЕРЖДАЮ

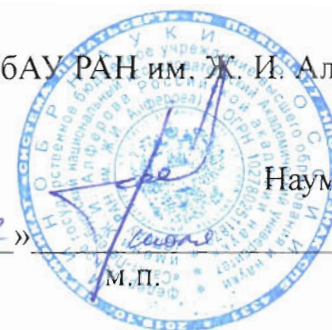
Ректор

СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова

Наумов А.Р.

«12» _____ 2024 г.

М.П.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук»

Диссертация «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискеро́в» в лаборатории Возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова)..

В период подготовки диссертации соискатель Надоян Ирина Валерьевна работала в должности лаборанта в лаборатории Возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук».

В 2020 г. Надоян И.В. защитила квалификационную работу на соискание степени магистра по направлению подготовки 03.04.02 «Физика», и получила диплом магистра с отличием Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена

В 2024 г. Надоян И.В. завершила обучение в аспирантуре очной формы в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук». Научный руководитель – Мухин Иван Сергеевич, д.ф.-м.н., доцент, директор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

По результатам рассмотрения диссертации «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискерев» принято следующее заключение:

1. Актуальность диссертационной работы.

Работа Надоян И. В. посвящена исследованию механических свойств углеродных нановискерев (УНВ), а также разработке на их основе детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний.

Постепенно растущие требования, предъявляемые к характеристикам устройств на основе микро- и наноструктур, стимулирует поиск новых путей совершенствования и улучшения их механических свойств. На сегодняшний день особое внимание привлекают нанoeлектромеханические системы (НЭМС), обладающие высокой чувствительностью к внешним воздействиям, а также обеспечивающие определение добавленных масс с точностью до массы 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. Указанные НМР имеют высокую чувствительность определения массы нанообъектов, однако, создание таких детекторов сопряжено с необходимостью использования процедур фотолитографии, напыления тонких слоев и плазменного 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) резонатора. В настоящее время для измерения механических параметров НЭМС требуются сложные оптические, механические или электронные системы детектирования. Эти системы могут быть интегрированы на одной подложке с НЭМС, вместе с ёмкостной или магнитодвижущей системой механической раскачки, или вынесены во внешнюю экспериментальную установку. Обычно в данных методиках необходимо проводить измерения при сверхнизких температурах. Несмотря на продемонстрированную высокую

чувствительность, эти системы сложны в производстве, а их реализация требует дорогостоящего оборудования для детектирования механических параметров наносистем. Перечисленные недостатки НМР могут быть преодолимы путем использования в качестве рабочего тела УНВ. УНВ обладают уникальными свойствами и преимуществами благодаря своей геометрии и 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 (FEBID). Для создания сенсоров на основе УНВ необходимы только установка химического травления металлических проволок и СЭМ. УНВ имеют относительно небольшую массу, при этом их механические резонансные частоты лежат в МГц диапазоне, что делает их чувствительными при детектировании сверхмалых масс и исследовании оптомеханических эффектов. В отличие от других методов создания НМР, изготовление детекторов на основе УНВ не требует использования фотолитографии, эпитаксии или напыления. Это снижает их стоимость и упрощает применение при экспресс-анализе. Для определения механических характеристик НМР предлагается использовать метод визуализации колебаний НМР непосредственно в СЭМ. Этот подход не требует дополнительных устройств для детектирования резонансных параметров наноосцилляторов.

Несмотря на то, что уже были проведены исследования по созданию масс-детекторов на основе углеродных нанотрубок и нановискеров, не было уделено достаточно внимания методике определения массы нанообъектов по отслеживанию смещения точки перегрузки 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. В отличие от данного метода, который требует длительного измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в СЭМ, предлагаемый в работе подход не приводит к образованию паразитного углеродного слоя на вискере под воздействием электронного пучка. Это, в свою очередь, напрямую влияет на точность определения массы. Хотя применение наноразмерных механических резонаторов в качестве чувствительных элементов детекторов масс является перспективным, вопрос использования составных систем резонаторов более сложной геометрии остаётся малоизученным. В системе связанных осцилляторов, например, может возникать резонанс Фано, характеризующийся резким фронтом АЧХ. Такие системы при определённой конфигурации позволяют увеличить чувствительность сенсоров масс 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 фоточувствительностью. В данной работе было проведено экспериментальное исследование воздействия лазерного излучения на наномеханические резонаторы на основе УНВ. Также было выполнено численное моделирование влияния оптических сил и фототермического эффекта на режимы механических колебаний УНВ. В качестве сенсора для детектирования эффектов, индуцируемых оптическим излучением, предлагается использовать нанооптомеханическую систему (НОМС) на основе углеродных вискоеров. Оптомеханические свойства нанорезонаторов могут быть усилены путём размещения на свободном конце вискоера металлической или диэлектрической оптической наноантенны. В диссертационной работе применялись Si наночастицы, обеспечивающие эффективное преобразование энергии света в тепло за счёт возникновения оптических резонансов Ми. Взаимодействие такой НОМС с лазерным излучением приводило к существенным изменениям резонансных свойств наномеханического резонатора из-за модулированного нагрева. Термооптические эффекты в нанофотонных структурах открывают уникальные возможности для полностью оптического управления одиночными рассеивателями, системами мстаршёток, модуляции генерации второй гармоники, достижения режимов бистабильности и невязимности.

Таким образом, тема рассматриваемой диссертационной работы, посвященная исследованию механических модулированных свойств наноразмерных систем на основе УНВ, является **актуальной** для дальнейшего развития современных детекторов массы и сенсоров, а также совершенствования их характеристик.

Целью диссертационной работы являлось исследование нанорезонансных детекторов масс, работающих на резонансах высших порядков, и сенсоров оптомеханических эффектов на основе УНВ.

Для достижения цели в рамках настоящей диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Развитие методов роста одиночных УНВ и создание наномеханических систем сложной формы на их основе.
2. Создание экспериментальной установки на базе сканирующего электронного микроскопа, в вакуумную камеру которого введено оптическое волокно, расположенное на прецизионном наноманипуляторе и подключенное к лазерному диоду, расположенному вне камеры микроскопа.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование колебательных мод высших порядков наноосцилляторов (в том числе двухсоставных) на основе УНВ.
4. Экспериментальная и теоретическая оценка чувствительности детекторов малых масс на основе одиночных и связанных (составных) наноосцилляторов из УНВ.

5. Экспериментальное определение влияния модулированного оптического излучения на режимы колебаний наноосцилляторов в виде УНВ с локализованными на их свободном конце оптическими наноантеннами, теоретическое описание полученных результатов.

2. Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.

Диссертация Надоян И., В. является самостоятельной и оригинальной научно-исследовательской работой, вклад автора диссертации в которую был определяющим. Личный вклад автора состоит в участии в постановке цели и задач исследований, анализе литературных источников по теме диссертации, разработке и реализации спектра технологических процессов создания наномеханических резонаторов на основе углеродных нановискеров. Все результаты экспериментальных и теоретических исследований, отраженных в данной диссертационной работе, получены и проанализированы лично автором, либо при его непосредственном участии.

3. Степень достоверности результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований.

Достоверность полученных методологических и экспериментальных результатов не вызывает сомнений благодаря широкому использованию современной экспериментально-технологической базы, методов физического эксперимента, повторяемостью и воспроизводимостью получаемых экспериментальных данных. Достоверность результатов и выводов подтверждается их активным обсуждением на всероссийских и международных конференциях, а также публикациями в престижных рецензируемых международных журналах. Полученные результаты хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными.

4. Научная новизна данной диссертационной работы обусловлена следующими пунктами:

- 1) Впервые разработана теоретическая модель, описывающая режимы механических колебаний составных вискероов различного размера в диапазоне диаметров до 500 нм и длин до 5 мкм. Показано, что при определенном выборе размеров вискероов в системе возможно возникновение механического резонанса Фапо с резким профилем амплитудно-частотной характеристики, что актуально при разработке чувствительных детекторов массы.

- 2) Экспериментально продемонстрировано возбуждение первой и второй резонансных частот УНВ и показано, что добавление массы на свободном конце УНВ приводит к сдвигу резонансных частот, а также детектируемому изменению положения точки перетяжки на второй резонансной частоте.
- 3) Впервые предложена экспериментальная методика по определению фокусного расстояния линзированного волокна.
- 4) Впервые предложена теоретическая модель, описывающая колебания резонатора на основе 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.
- 5) Впервые экспериментально показано, что локализация оптической наноантенны, спектральное положение резонанса M_1 которой совпадает с длиной волны внешнего лазерного излучения, на свободной вершине нанорезонатора приводит к увеличению глубины модуляции колебаний в фокусе лазерного пучка.

5. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Результаты, полученные в рамках данной работы, могут лечь в основу дальнейших исследований детекторов на основе УНВ и улучшения их характеристик. Практическая значимость диссертационной работы состоит в предложенной конструкции резонатора на основе составных нановискеров, обеспечивающей увеличение чувствительности системы к локализации добавочной массы на свободном конце, а также в новом подходе детектировании оптомеханических эффектов с применением УНВ, который может применяться 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 оптическое волокно, обеспечивающее 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 осциллирующих вискеров, находящихся в фокусе лазерного пучка.

6. Общая оценка диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой

литературы. Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность научного исследования, указываются научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре и объеме диссертации, а также апробации результатов исследования.

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 проведенных исследований. Приведены описания экспериментальных установок, их особенностей.

В третьей главе рассмотрена аналитическая модель механических колебаний нановискера с добавочной массой на свободном конце и установлено, что добавление массы приводит к смещению резонансных частот нановискера, а также к изменению формы колебаний. Детально рассмотрены две первые фундаментальные моды. Теоретически продемонстрировано, что добротность пика АЧХ на первой резонансной частоте выше, чем на второй, но в рассматриваемых экспериментальных условиях слежение за положением точки перегиба высших колебательных мод является наиболее предпочтительным методом детектирования массы, так как не требуется длительное экспонирование УНВ под электронным пучком. Также в работе проведена оценка чувствительности детекторов малых масс на основе одиночных и связанных (составных) наноосцилляторов из УНВ. Показано, что использование системы связанных механических резонаторов консольного типа с определенным соотношением геометрических параметров теоретически позволяет увеличить точность измерений добавленной массы, основанных на сдвиге узлов колебаний, за счет возникновения резонанса Фано с резким профилем АЧХ.

В четвертой главе описываются результаты исследования модуляции режимов колебаний, индуцированной лазерным излучением, наномеханических систем, состоящих из УНВ и локализованных на их вершине кремниевых наночастиц. Такой подход позволяет исследовать новые оптомеханические и фотоиндуцированные эффекты при интенсивном оптическом излучении. Показано, что воздействие лазерного излучения приводит к сдвигу первой резонансной частоты в область меньших значений и увеличению амплитуды НОМС на основе УНВ. При этом, повышение мощности лазера увеличивает данный эффект.

Присутствие наночастицы усиливает оптически индуцированные изменения в режиме колебаний нановискера за счет совпадения спектрального положения резонанса Ми кремниевой наночастицы с длиной волны внешнего лазерного излучения. Наблюдаемая оптическая модуляция механических свойств колеблющихся УНВ объясняется в рамках двух основных подходов. Первый связан с воздействием оптических сил, возникающих в перетяжке гауссова пучка, второй — с модулированным оптическим нагревом наносистемы и связанными с ним термооптическими эффектами. Определено, что основным механизмом, ответственным за изменение частоты и амплитуды колебаний, является модулированный оптический нагрев частицы и нановискера. В работе проведена прямая оптическая термометрия наноструктуры за счет наличия кремниевой наночастицы, обеспечивая детектирование нагрева наномеханической структуры выше 600 К. Также важным является описанное в работе наличие оптотермической модуляции, которая дополнительно усиливается из-за ее параметрического характера при прохождении колеблющегося УНВ через перетяжку оптического луча с удвоенной частотой. Последний механизм приводит к увеличению амплитуды колебаний более чем в два раза при мощности лазера 80 мкВт (в сравнении с резонатором без частицы). Таким образом, исследуемые наномеханические системы представляют собой уникальную оптико-механическую платформу, характеризующуюся связью оптических и механических характеристик наноосциллятора, усиленную резонансами Ми кремниевой наночастицы, и дополнительной функцией локального мониторинга температуры с помощью оптической КРС термометрии.

Таким образом, структура и содержание работы свидетельствуют, что диссертация представляет собой завершенное научное исследование, в котором показана актуальность, новизна и перспективность подходов. Выводы и заключения обоснованы и имеют научную и практическую ценность для исследования детекторов масс и сенсоров оптомеханических эффектов на основе УНВ.

Результаты диссертационной работы опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных работах в профильных журналах по данной тематике исследований: *Advanced Optical Materials*, *ACS Applied Nano Materials*, *Journal of Physics: Conference Series* и др., индексируемых в Scopus и WoS.

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

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

7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основное содержание диссертации опубликовано в 4 статьях в изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus, и входящих в перечень ВАК:

1. **Nadoyan I. V.**, Solomonov N. A., Novikova K. N., Pavlov A. V., Sharov V. A., Mozharov A. M., Permyakov D. V., Shkoldin V. A., Kislov D. A., Shalin A. S., Golubok A. O., Petrov M. I., and Mukhin I. S. Parametric Optothermal Modulation of Carbon Nanooscillator Decorated with Mie Resonant Silicon Particle // Adv. Optical Mater. 2024, 2400228, p. 1-7.
В данной работе исследуется параметрическая оптогермическая модуляция ИМР, на основе углеродных вискеро́в. Описан механизм модуляции колебаний УНВ, обусловленный периодическим оптическим нагревом нановискера и дальнейшей модуляции параметров упругости. Использование наночастиц кремния обеспечивает дополнительную функциональность благодаря оптическому поглощению, усиленному резонансом Ми, и уникальной особенности оптической рамановской термометрии, обеспечивающий оптический мониторинг локальной температуры. Показано, что параметрический механизм модуляции позволяет существенно повысить связь оптических и механических эффектов.
2. Mozharov A.M., Berdnikov Y.S., Solomonov N. A., Nadoyan I.V., Novikova K.N., Shkoldin V.A., Golubok A.O., Kislov D.A., Shalin A. S., Petrov M.I., and Mukhin I.S. Nanomass

Sensing via Node Shift Tracing in Vibrations of Coupled Nanowires Enhanced by Fano Resonances // ACS Appl. Nano Mater. 2021, 4, 11, p. 11989–11996.

В работе исследовалась чувствительность детекторов малых масс на основе одиночных и связанных (составных) наноосцилляторов из УНВ. Показано, что использование системы связанных механических резонаторов консольного типа с определенным соотношением геометрических параметров позволяет увеличить точность измерений добавленной массы, основанных на сдвиге узлов колебаний, за счет возникновения в системе резонансов Фано с резким профилем АЧХ.

3. Nadoyan I.V., Solomonov N.A., Novikova K.N., Sharov V.A., Mozharov A.M., Kislov D.A., Petrov M.I., Mukhin I.S. Nanooscillators based on carbon whiskers for detectors of optomechanical effects // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. No. 3.1, p. 182-186.

В работе исследован резонансный метод для определения влияния фотоиндуцированного нагрева лазерным излучением на механические системы на основе углеродных вискерев. Демонстрируется быстрый и универсальный подход к созданию резонансных наноосцилляторов в качестве детекторов влияния оптического излучения на свойства нанообъектов. Экспериментально выявлено влияние лазерного излучения на механические свойства нанорезонаторов и визуализирована форма их колебаний на первой резонансной частоте. Продемонстрированный подход к обнаружению влияния оптического излучения на колебательные характеристики наноосцилляторов прокладывает путь к созданию новых фотогермических и оптомеханических датчиков.

4. Solomonov N. A., Novikova K. N., Nadoyan I. V., Mozharov A. M., Shkoldin V. A., Berdnikov Y. S. and Mukhin I. S. Nanoobject mass measurement using the node displacement of the second mode of the nanomechanical resonator // Journal of Physics: Conference Series v. 2086 (2021) p.012026.

Данная работа предлагает новый подход к взвешиванию наноразмерных объектов, помещенных на кончике кантилевера, вибрирующего внутри камеры сканирующего электронного микроскопа. В отличие от традиционного подхода к определению массы, в качестве альтернативы измерению сдвига частоты предлагается отслеживать сдвиг положения узла второй моды колебаний. Продемонстрировано применение такого подхода к углеродным нановискерам, выращенным на вольфрамовых иглах методом осаждения под сфокусированным электронным лучом. Экспериментально сравнивалась эффективность предлагаемого подхода с традиционным методом, основанным на частотном сдвиге.

Также по результатам представлений результатов исследований на конференциях опубликовано 5 работ:

1. Nadoyan I. V., Solomonov N. A., Novikova K. N., Sharov V. A., Logunov L. S., Kislov D. A., Petrov M. I., Mukhin I.S. Nanooscillators based on carbon whiskers for detectors of optomechanical effects // BOOK of ABSTRACTS «Saint Petersburg OPEN 2023», p. 414-416.
2. Надоян И.В., Соломонов Н.А., Новикова К.Н., Павлов А.В., Шаров В.А., Можаров А.М., Пермяков Д.В., Кислов Д.А., Шалин А.С., Голубок А.О., Петров М.И., Мухин И.С. Параметрическая оптотермическая модуляция углеродного нанорезонатора с локализованной резонансной частицей кремния // тезисы докладов Молодежной Школы по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, p. 68.
3. Solomonov N. A., Novikova K. N., Nadoyan I. V., Mozharov A. M., Shkoldin V. A., Mukhin I. S. Nanoobject mass measurement using the node displacement of the second harmonic of the nanomechanical resonator // BOOK of ABSTRACTS «Saint Petersburg OPEN 2021», p. 140-141.
4. Новикова К.Н., Соломонов Н.А., Надоян И.В., Школдин В.А., Бердников Ю.С., Можаров А.М., Мухин И.С. Резонансные масс-детекторы с увеличенной точностью на основе одиночных углеродных нановискеров, работающих на втором резонансе // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых, 2022. – 149 с.
5. Соломонов Н.А., Можаров А.М., Бердников Ю.Г., Новикова К.Н., Надоян И.В., Школдин В.А., Мухин И.С. Увеличение чувствительности наномеханических детекторов масс на основе связанных углеродных нановискеров // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых, 2022. – 195 с.

Таким образом, диссертация Надоян И. В. на тему «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискеро́в», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, представляющей научный и практический интерес. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация полностью отвечает паспорту специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики», что полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на

соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор – Надоян Ирина Валерьевна заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Диссертационная работа и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на научном семинаре Центра нанотехнологий «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» (Протокол №2 от 27 июня 2024 г.).

Заключение составил:

Заведующий лабораторией
СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова
д.ф.-м.н.

Тел.: +7 (812) 448-85-91
e-mail: george.cirlin@mail.ru

Г.Э. Цырлин

