

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение Диссертационного совета от «20» декабря 2024 г. № 4

о присуждении Надоян Ирине Валерьевне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование чувствительности детекторов массы и сенсоров оптически модулированных колебаний на основе наноструктур из углеродных вискероов» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 13.09.2024 г., протокол № 3, Диссертационным советом 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.31-33, лит.А, приказ от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель: Надоян Ирина Валерьевна, 1995 года рождения, в 2020 г. окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». Диплом магистра с отличием № 107827 0001925 выдан 13.07.2020.

Надоян Ирина Валерьевна обучалась в аспирантуре с 01.09.2020 по 31.08.2024 в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (далее СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова) и освоила программу подготовки научно-педагогических кадров по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь», протокол № 1/4-24 от 10.06.2024. Диплом № 107824 1484708 выдан 17.06.2024.

В настоящее время Надоян Ирина Валерьевна работает лаборантом в лаборатории Возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова.

Диссертация выполнена в СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова.

Научный руководитель: Мухин Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, в настоящее время проректор по науке, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж.И.

Алферова. На период подготовки диссертации и подачи документов в совет, директор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (далее ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Официальные оппоненты:

1) Юлин Алексей Викторович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник физического факультета ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

- 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 взгляд, 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 приводятся 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 частот 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?

2) Баимова Юлия Айдаровна, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующая лабораторией «Физика и механика углеродных наноматериалов» в ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов

Российской академии наук», представила на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

- 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 вискероов 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 наноантенны для детектирования оптомеханических эффектов предлагается использовать углеродный вискер с локализованной Si частичкой, однако, не приводится описание, почему в качестве материала частицы выбран именно кремний.

Ведущая организация - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (далее СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), в своем **положительном заключении**, утвержденном Семеновым Александром Анатольевичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой физической электроники и технологии факультета электроники, проректором по научной и инновационной деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ», подписанном Зубковым Василием Ивановичем, доктором физико-математических наук, профессором, заместителем заведующего кафедрой Микро- и наноэлектроники факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», указала, что диссертация Надоян И.В. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2, и отметила следующие замечания:

1. В работе не отражено, проводилось ли исследование структуры углеродных нановискероов. Остается открытым вопрос, можно ли отжигать углеродные вискеры и как это отразится на его механических свойствах.
2. Насколько сильно влияет паразитная нарощенная масса? Какой предел измерения массы с применением углеродных нановискероов?
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 нановискероов на модах более высоких порядков

(после второй).

Соискатель имеет **18 (восемнадцать)** опубликованных работ, из них по теме диссертации **9 (девять)** опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и Международные библиометрические базы Scopus и/или Web of Science.

К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

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.

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.

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.

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.*

На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:

1) От Фирсова Дмитрия Анатольевича, доктора физико-математических наук, профессора Высшей инженерно-физической школы Института электроники и телекоммуникаций ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Замечания:

1. Из текста автореферата не совсем ясно, каким образом наночастица кремния фиксировалась на конце углеродного вискера (глава 2).

2. Следовало бы привести в автореферате непосредственное изображение экспериментальной установки резонансного возбуждения колебаний, которую автор использовал в рамках исследований механических параметров НМР на основе УНВ (глава 2).

2) От Саранина Данилы Сергеевича, кандидата технических наук, заведующего Лабораторией перспективной солнечной энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС».

Замечания:

1. В автореферате не приводятся подробные рассуждения, обосновывающие выбор Si частички в качестве наноантенны для детектирования оптомеханических эффектов в нанооптоэлектромеханической системе на основе УНВ.
2. В автореферате не раскрыто, каким образом определялось расстояние до точки перетяжки вискера, колеблющегося на второй резонансной моде.

3) От Ложкина Максима Сергеевича, кандидата физико-математических наук, специалиста ресурсного центра «Нанофотоника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Замечания:

1. Используемые теоретические модели описывают плоские колебания УНВ, при этом отсутствуют комментарии, относящиеся к определению направления плоскости колебаний свободного УНВ, а также возможного изменения этого направления в связи с размещением точечной массы на свободном конце УНВ. Асимметричная форма колебаний, которую можно заметить на СЭМ-изображениях на рис. 9 и 10, может быть связана с отклонением колебаний от плоской формы, а также с искажением при проецировании колебания на плоскость наблюдения.
2. Представленная на рис. 15 зависимость чувствительности двухсегментного УНВ от радиусов оснований нижнего и верхнего сегментов содержит прилегающую к оси абсцисс область, отвечающую наибольшей чувствительности вплоть до величины 1000 нм/фг, на которую ссылается автор работы в тексте при оценке порога детектируемых масс. Данная область соответствует значениям диаметра основания верхнего сегмента менее 20 нм, что вызывает вопрос о практической применимости соответствующих двухсегментных систем на практике.
3. Аналитическая модель механических колебаний в условиях периодической модуляции оптическим нагревом, представленная в главе 4, не отражает эффект насыщения кривой роста амплитуды колебаний при увеличении мощности лазерной накачки УНВ, который можно заметить на рис. 18-в. Кроме того, не вполне понятно, отражает ли данная модель влияние наночастицы, закреплённой на свободном конце УНВ, что, как отмечает автор работы, придаёт более выраженный характер зависимости изменения амплитуды и частоты колебаний от мощности лазерной накачки системы.

4) От Заморянской Марии Владимировны, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника, заведующей лабораторией «Диффузии и дефектообразования в полупроводниках» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Замечания:

1. Из автореферата не ясно, каким конкретно образом и при каких условиях были получены наноуглеродные вискеры, благодаря чему имелась возможность получать вискеры заданного размера (длины и толщины).
2. Из автореферата непонятно, каким образом крепились наночастицы кремния на вершину вискера, измерялась ли их масса другими методами.
3. Также не понятно, имеет ли значение при таких измерениях форма и размер исследуемой частицы, учитывалось ли это в теоретических расчетах.

5) От Кукушкина Сергея Арсеньевича, доктора физико-математических наук, заслуженного деятеля науки РФ, заведующего лабораторией Структурных и фазовых превращений в конденсированных средах Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук».

Отзыв без замечаний.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом работы в областях физики микро- и наноструктурных объектов, моделирования процессов механических процессов, оптических наноантен и разработки устройств, работающих на основе электромеханических и оптомеханических эффектов, что подтверждается публикациями, в которых рассматриваются вопросы, связанные с тематикой диссертационного исследования соискателя.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **предложена** методика определения масс нанообъектов с пределом детектирования единицы фемтаграмм по сдвигу положения точки узла (пучности) колебаний наноосцилляторов кантилеверного типа на второй резонансной моде с применением углеродных вискером диаметром порядка 150 нм и длиной порядка 5 мкм;

- **выполнено** сравнение результатов применения методики определения массы нанообъектов по сдвигу первой резонансной частоты и по смещению положения точки узла (пучности) колебаний на второй резонансной моде при

локализации добавочной массы на свободной вершине вискера, **выявлены** преимущества методики, основанной на использовании второй резонансной моды, так как указанный метод не требует длительной процедуры записи амплитудно-частотной характеристики, что уменьшает паразитное обрастание осциллятора углеродом при визуализации в сканирующем электронном микроскопе;

- **предложена** конструкция составной кантилеверной резонансной системы на основе последовательно соединенных двух вискерев, позволившая увеличить точность измерения массы резонансным методом по сравнению с резонаторами на основе одиночных вискерев;

- **разработана** теоретическая модель, описывающая режимы колебаний наномеханической системы на основе составных вискерев, в приближении малых линейных колебаний, определяющая диапазоны размеров составных частей для повышения чувствительности системы при взвешивании добавленной массы в сравнении с односоставными осцилляторами;

- **выполнена** оценка предельной чувствительности системы на основе составных вискерев различного размера в диапазоне диаметров до 500 нм и длин до 5 мкм, что позволяет проектировать детекторы с увеличенной чувствительностью определения массы нанообъектов при заданных геометрических параметрах. **Показано**, что при определенных размерах вискерев в системе возможно возникновение механического резонанса Фано с резким профилем амплитудно-частотной характеристики;

- **создана** экспериментальная установка по определению фокусного расстояния линзированного волокна методом анализа амплитуды колебаний углеродного нанорезонатора на первой резонансной моде при расположении его в фокусе линзы;

- **предложена** теоретическая модель, описывающая колебания резонатора кантилеверного типа на основе одиночного углеродного вискера, 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;

- **выявлено**, 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 вискера в фокусе лазерного пучка.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации эффективно, с получением обладающих новизной результатов:

- **Предложено** использовать систему дифференциальных уравнений Эйлера-Бернулли в частных производных для определения масс нанообъектов, локализованных на свободном конце осциллятора кантилеверного типа, по сдвигу положения точки узла (пучности) колебаний на второй резонансной частоте колебаний;

- **обоснована** математическая модель, описывающая режимы колебаний составных осцилляторов кантилеверного типа на модах старших порядков и предсказывающая возникновение в такой системе механического резонанса Фано;

- **обоснована** математическая модель, описывающая возникновение в резонаторе кантилеверного типа параметрического резонанса при модулированной засветке лазерным излучением и экспериментально **подтверждена** ее адекватность.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

полученные в ходе выполнения работы результаты находят практическое применение и в дальнейшем могут быть востребованы в научных и образовательных центрах, на предприятиях, занимающихся разработкой и производством детекторов малых масс и сенсоров оптомеханических эффектов, в том числе в Санкт-Петербургском государственном университете, ФГАОУ ВО «СПбПУ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, компаниях ООО «НТ-СПб» (Санкт-Петербург) и ОАО «Авангард» (Санкт-Петербург).

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что научные положения, выводы и результаты, содержащиеся в диссертации, подтверждаются использованием признанных, апробированных и обоснованных физических методов, комплексным характером выполненных экспериментов и исследований численными методами с использованием лицензионных программных пакетов, а также воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечена использованием метрологически поверенного оборудования. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими оценками и результатами моделирования.

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Saint Petersburg OPEN 2021» 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. Saint Petersburg, Russia, May 25-28, 2021.; XVII Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 13–15 сентября 2022 г.; «Saint Petersburg OPEN 2023» 10th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. Saint Petersburg, Russia, May 23-25, 2023; «Молодежная Школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024)». НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ. пос. Лосево, Ленинградская область, 11 - 15 марта 2024 г.

Личный вклад соискателя заключается в следующем:

- Изготовление экспериментальных образцов наноосцилляторов.
- Исследование амплитудно-частотных характеристик наноосцеляторов на основе углеродных вискерев.
- Формирование математической модели процессов колебаний нанорезонатора на первой и второй резонансных модах.
- Создание экспериментальной установки на основе сканирующего электронного микроскопа, в камере которого объединены твердотельная игла с нанорезонатором, линзированное оптоволокно и сфокусированный электронный пучок. Установка также обеспечивала позиционирование нанообъектов на свободный конец нанорезонатора с применением механического наноманипулятора.
- Организация и проведение численных и экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов.
- Подготовка научных публикаций совместно с коллегами.
- Представление результатов работы на конференциях.

На заседании 20 декабря 2024 года Диссертационный совет принял решение присудить Надоян Ирине Валерьевне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве **16** человек, из них **16** докторов наук, участвовавших в заседании, из **21** человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **16**, против – **нет**, недействительных бюллетеней – **нет**.

Председатель
Диссертационного совета
д.т.н., профессор

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Дата оформления заключения
20 декабря 2024 г.
М.П.



В.Е. Курочкин

А.Л. Буляница