

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Лукашенко Станислава Юрьевича на тему «**Особенности использования СЗМ-зондов в нанодиагностике**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность темы рассматриваемой работы обусловлена чрезвычайной востребованностью методов на основе сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) для исследования как наноматериалов, наноструктур, нанообъектов различного рода, так и других материалов и приборных структур на их основе, а также биологических объектов. К настоящему времени семейство методов СЗМ уже внесло весомый вклад в исследование наноматериалов, позволяя проводить исследования не только морфологии поверхности, но и получать качественную и количественную информацию о различных свойствах образцов с высоким пространственным разрешением (электрофизические, механические, магнитные и др.). Кроме того, СЗМ обладает мощными технологическими возможностями.

Ключевым инструментом в СЗМ является твердотельный зонд малых размеров, качество, пространственные размеры и форма, конфигурация которого будут определять разрешение, уровень шумов и т.п., а в конечном итоге возможности методик и достоверность измеряемых величин. Развитие техники в области создания зондовых датчиков в СЗМ направленно не только на уменьшение их физических размеров (уменьшения радиуса закругления) для улучшения пространственного разрешения методик, но и в направлении усложнения конструкции таких датчиков. Фактически, для многих специальных методов СЗМ, таких как сканирующая СКВИД-микроскопия, сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия, сканирующая капиллярная микроскопия и другие зондовый датчик представляет собой микроминиатюрный прибор. При этом необходимы исследования особенностей и возможных размерных эффектов, возникающих при взаимодействии зонда малого размера с реальной поверхностью в различных средах, нужны разработки методик и исследования характеристик таких зондовых датчиков.

Таким образом, тема данной работы является актуальной и представляет научный и практический интерес.

Основные результаты, полученные автором, их научная и практическая значимость

Основные научные результаты работы обладают научной новизной и практической значимостью.

Из наиболее важных научных результатов необходимо выделить следующие:

- выявлены особенности взаимодействия острия высокоаспектных зондовых датчиков с поверхности образца, приводящие к снижению пространственного разрешения метода СЗМ за счет паразитных латеральных колебаний острия зонда, разработана модель и даны количественные оценки амплитуде таких колебаний, предложены пути снижения вклада таких колебаний за счет изменения конструкции зондового датчика;

- впервые создан резонансный детектор массы на основе высокоаспектного зондового датчика, острие которого выполнено из W проволоки с углеродным нановискером и специально сформированными захватами на острие, позволяющий определять массу объектов в диапазоне ультрамалых значений 10^{-14} - 10^{-17} г;

- очень интересные результаты получены по наблюдению аномального характера поведения добротности наномеханического осциллятора, состоящего из W проволоки с выращенным на острие углеродным нановискером на воздухе по сравнению с вакуумом, а также результаты моделирования, количественных оценок и анализа механизмов перераспределения и диссипации энергии в такой сложной, состоящей из нескольких связанных осцилляторов колебательной системе безусловно полезные не только в области развития зондовых датчиков СЗМ, но и при изучении механических и реологических свойств сложных по составу и строению нанообъектов и наносистем в различных средах;

- новизной и научной значимостью для развития семейства методов жидкостной СЗМ обладает группа результатов по детальному исследованию экспериментальных зависимостей ионного тока, протекающего в системе «зонд-нанопипетка сканирующей капиллярной микроскопии – образец» при различных условиях, а также развитые в данной работе модельные представления для такой системы.

Среди практически значимых результатов хотелось особенно бы выделить следующие:

- рекомендации по оптимизации конструкции зондовых датчиков для снижения вклада паразитных эффектов в аналитический сигнал, включая геометрические параметры зондов, в том числе для зондов-нанопипеток и зондов конструкции типа «self-sensing»;

- методики и алгоритмы экспериментального определения резонансных характеристик и построения амплитудно-частотных зависимостей для нанообъектов (наномеханических осцилляторов) различной формы по данным сканирующей электронной микроскопии;

- практической значимостью обладает разработанная методика создания зондов с углеродными нановискерами и V-образными наноловушками на их вершине, а также оригинальная методика закрепления в них наночастиц по принципу электростатического нанопинцета, показанная на примере наночастиц золота, без применения какого-либо адгезива, что важно для сохранения свойств закрепленных наночастиц (каталитических, плазмонных, оптических и др.) и их дальнейшего использования.

- с точки зрения практического применения в плане выбора адекватных условий организации работы микроскопа в сканирующей капиллярной микроскопии важными являются результаты исследования экспериментальных зависимостей ионного тока от расстояния и условий возникновения пика при приближении зонда к поверхности образца.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается грамотным обоснованием всех выводов и научных положений. В тех случаях, когда возможно сравнение с известными зависимостями, полученные результаты согласуются с литературными данными. Результаты диссертационной работы опираются на значительный объем экспериментальных данных, полученных на современном оборудовании, что обеспечивает надежность и обоснованность основных положений и выводов работы.

Надежность полученных данных обеспечивается применением современных методов исследования, а именно методов семейства сканирующей зондовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, конфокальной оптической лазерной сканирующей микроскопии, сканирующей (капиллярной) микроскопии токов ионной проводимости и др.

Апробация работы

Результаты диссертации были представлены на более 15 международных и всероссийских научно-технических конференциях, семинарах, симпозиумах, школах. По теме диссертации опубликовано 11 научных статей в ведущих российских и международных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ в ведущих российских и международных рецензируемых научных изданиях, из них – 8 научных статей в журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ к публикации результатов диссертационных исследований, а также 9 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа Лукашенко Станислава Юрьевича на тему «Особенности использования СЗМ-зондов в нанодиагностике», представленная к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики является самостоятельным законченным научно-квалификационным исследованием и соответствует паспорту специальности. Работа носит экспериментальный характер.

Внутреннее единство структуры работы

В диссертационной работе Лукашенко С.Ю. соблюдены принципы соответствия задач исследования и поставленной цели, задач исследования и

полученных результатов, содержания диссертации и опубликованных работ. Материал диссертации изложен последовательно, полно, логично с использованием грамотного научного языка. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Содержание диссертации и ее завершенность

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации к оформлению диссертаций. Диссертация объемом 143 страницы состоит из введения, четырех глав и заключения. Библиографический список включает 115 наименований. Материал изложен последовательно и логично, диссертация написана грамотным научно-техническим языком. Диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, все поставленные в работе задачи выполнены. В диссертации и автореферате в полной мере представлены необходимые результаты для изучения и ознакомления с работой. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания

В качестве замечаний нужно отметить следующие:

- Из текста диссертации остается неясным возможно ли применение резонансного детектора массы на основе высокоаспектного зондового датчика с наноловушками для определения массы живых объектов в жидкости. Насколько при этом сохранится диапазон, в котором можно достоверно определить массу таких объектов? Есть ли ограничения по значениям рН или вязкости таких жидкостей?

- Проводились ли оценки того, насколько прочно закреплен углеродный нановискер на острие вольфрамового зонда? Сколько «актов взвешивания» можно провести? Как влияет внешняя среда на срок службы такого зондового датчика?

- Интересна возможность применения так называемого «пик-эффекта» в методе СКМ для определения локальной жесткости мягких образцов в жидкости, но остается неясным диапазон возможных измеряемых жесткостей таких объектов и локальность метода.

- В несколько непривычном виде представлена цель работы, а точнее их сформулировано четыре для данного исследования. На мой взгляд, было бы полезно, если бы диссертант смог бы выделить кратко главную, объединяющую более частные задачи, общую цель.

- В тексте диссертации и автореферате присутствуют незначительные грамматические ошибки и опечатки.

Заключение

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на основные выводы и защищаемые положения работы.

Диссертация Лукашенко Станислава Юрьевича на тему «Особенности использования СЗМ-зондов в нанодиагностике», представленная к защите на

соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики» (пункт 2 “Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений”; пункт 5 “Исследование фундаментальных ограничений на точность измерений”; пункт 8 “Разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента”; пункт 10 “Моделирование физических явлений и процессов”). является самостоятельным законченным научно-квалификационным исследованием и соответствует паспорту специальности. Поставленные задачи диссертационного исследования выполнены в полном объеме.

По содержанию, актуальности и научной новизне, объёму проведённого исследования, значимости полученных результатов и выводов диссертация Лукашенко С.Ю. на тему «Особенности использования СЗМ-зондов в нанодиагностике» соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, в редакции от 25.01.2024 г.) с изменениями и дополнениями, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Лукашенко Станислав Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,
доцент кафедры микро- и наноэлектроники
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина),
доктор технических наук, доцент
«27» март 2025 г.

 ЗАВЕРЯЮ:
М.В. СОКОЛОВА
2025
Спивак Юлия Михайловна

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

Почтовый адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф Спивак Юлия Михайловна, доктор технических наук (05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники), доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники

Телефон: +7 812 234-31-64

Адрес электронной почты: ymspivak@etu.ru

подпись

дата

Подпись доктора технических наук, доцента кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Спивак Юлии Михайловны верна.