

ОТЗЫВ

официального оппонента Дунаевского М.С.

на диссертационную работу Лукашенко Станислава Юрьевича
«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»

Методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) являются основой современной нанодиагностики и позволяют с нанометровым и субнанометровым пространственным разрешением исследовать различные физические свойства поверхности. Высокая точность СЗМ и высокое пространственное разрешение определяются в первую очередь характеристиками СЗМ-зонда (радиус закругления кончика зонда и аспектное соотношение), а также условиями детектирования взаимодействия СЗМ-зонда с поверхностью (наличие либо отсутствие паразитных латеральных колебаний кончика зонда). Поиск оптимальных зондов и условий для наиболее точного измерения физических свойств поверхности является важной задачей. Кроме того, так как СЗМ-зонды позволяют детектировать достаточно малые силы, то на их основе могут быть созданы высокочувствительные сенсорные устройства.

В связи с этим, **актуальность** диссертационной работы Лукашенко С.Ю., посвященной поиску оптимальных параметров формы СЗМ-зондов для наилучшего разрешения и созданию сенсорных устройств на базе СЗМ-зондов, не вызывает сомнения.

Текст диссертационной работы изложен на 143 страницах, включая 94 рисунка. Работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Список литературы содержит 115 наименований. Работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, приводятся основные защищаемые положения, дана оценка новизны работы, научной и практической значимости, методологии исследования, а также приведены данные об апробации работы.

В первой главе приводится обзор литературы по существующим типам СЗМ-зондов применяемых в различных режимах СЗМ. Особое внимание уделяется зондам для режимов сканирующей туннельной микроскопии, сканирующей силовой микроскопии, сканирующей оптической микроскопии ближнего поля и сканирующей капиллярной микроскопии, что обусловлено их активным применением в диссертационной работе. Приведены основные сведения о микро- и наномеханических сенсорных устройствах, которые можно создать на базе СЗМ-зондов и которые будут созданы и исследованы в диссертационной работе.

Во второй главе приведены расчёты (в среде Comsol) амплитудно-частотных характеристик для СЗМ-зондов из различных материалов и с различной формой. Также приведены расчёты величины паразитных латеральных колебаний кончика СЗМ-зонда, что может оказывать негативное влияние на разрешающую способность СЗМ. Определены основные факторы, позволяющие существенно снижать величину паразитных латеральных колебаний. Также были определены характерные времена затухания паразитных колебаний, возникающих в режиме “хоппинг” и предложен способ минимизации данного негативного эффекта.

В третьей главе приведены основные экспериментальные результаты по созданию углеродных нановискеров на СЗМ-зонде при воздействии электронного пучка. Также продемонстрирована возможность создания сложных наноразмерных структур (типа “камертон” и т.п). Особое внимание уделено экспериментальному измерению амплитудно-частотных характеристик углеродных нановискеров с помощью электронной микроскопии (в вакууме) и конфокальной оптической микроскопии (в

обычных условиях). Обнаружен эффект аномально большого сдвига резонансной частоты нановискеров при переходе от вакуумных условий к комнатной атмосфере. Для объяснения эффекта предложена модель связанных осцилляторов (нановискер-зонд). По измеренным значениям резонансной частоты определён модуль Юнга углеродных нановискеров. Продемонстрированы режимы сложных колебаний в системе зонд-нановискер (вращательные резонансные моды и колебания каркасных структур). Выполнена автоматизация измерений амплитудно-частотных характеристик нановискера при быстром сканировании электронным пучком поперёк оси нановискера. Разработан метод закрепления наночастиц в специальных “выемках”, созданных на кончике нановискера. Это позволило создать на базе углеродных нановискеров сенсор массы частиц на диапазон 10^{-17} – 10^{-14} г.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию протекания ионного тока через малую апертуру в методе сканирующей капиллярной микроскопии. Продемонстрирован “пик-эффект” – эффект немонотонной зависимости величины ионного тока при приближении апертурного зонда к поверхности. Для ряда случаев продемонстрировано нарастание ионного тока при приближении к поверхности. Для объяснения пик-эффекта выполнено моделирование в системе Comsol. Показано, что для объяснения наблюдаемого в эксперименте поведения ионного тока необходимо применять достаточно сложную модель Пуассона – Нернста – Планка с учётом электроосмотического потока (уравнение Навье-Стокса и уравнение Гельмгольца-Смолуховского), а также учитывать увеличение вязкости при расстояниях зонд-поверхность менее 40 нм. Предложен неразрушающий метод определения размера апертуры зонда (исходя из вида вольт-амперной характеристики) в методе сканирующей капиллярной микроскопии.

В заключении приведены основные выводы, полученные в рамках диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:
i) впервые экспериментально продемонстрирована возможность закрепления

наночастиц на кончике углеродного нановискера с использованием специально приготовленных “выемок”, ii) впервые реализован сенсор массы частиц на диапазон 10^{-17} – 10^{-14} г на базе углеродных нановискеров, iii) обнаружен “пик-эффект” (эффект немонотонной зависимости величины ионного тока при приближении апертурного зонда к поверхности) и разработана модель, качественно и количественно объясняющая данный эффект.

Достоверность полученных научных результатов обеспечивается использованием признанных аналитических методов, высокоточного современного измерительного оборудования, методов сканирующей зондовой микроскопии, а также достаточно большим количеством проведенных измерений.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования результатов при разработке сенсорных устройств на диапазон масс 10^{-17} – 10^{-14} г, перспективный для взвешивания вирусов, бактерий, белков и наночастиц любой природы. Высокая добротность сенсора на базе углеродного нановискера как в вакууме, так и при атмосферных условиях, является принципиально важным результатом для биомедицинских приложений.

Все защищаемые положения и выводы работы **обоснованы** и изложены в тексте диссертационной работы.

Результаты работы изложены в 16 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата наук.

В качестве **замечаний и комментариев** к диссертационной работе можно отметить следующее:

1) В главе 2 автор достаточно подробно исследует причины возникновения паразитных латеральных колебаний зонда и приводит убедительные рекомендации по уменьшению этих колебаний. Полагаю, автор мог бы

продемонстрировать СЗМ-изображения полученные неоптимальными зондами, в которых исследуемые объекты “искажены вдоль направления колебаний”. Это бы наглядно продемонстрировало негативную роль латеральных колебаний в формировании СЗМ-изображения.

2) В главе 2 автор определяет характерные времена затухания паразитных колебаний, возникающих в режиме “хоппинг”. Данные колебания возникают при резких движениях зонда вверх-вниз. Возможно ли как-то в режиме хоппинг модифицировать алгоритм движения зонда чтобы сделать его более “плавным” и избежать таким образом возникновения паразитных колебаний зонда?

3) В главе 3 автор объясняет сильный сдвиг резонансной частоты нановискеров при переходе от вакуумных условий к комнатной атмосфере в рамках модели связанных осцилляторов. На Рисунке 53 приведен расчет АЧХ в модели связанных осцилляторов с разными константами связи (0.1, 4, 13). При одном из значений константы связи возникает резонансный пик на частоте 5.5 МГц, что хорошо согласуется с экспериментом. При этом также возникает достаточно сильный низкочастотный резонанс на частоте около 1.6 МГц. Вопрос – удавалось ли экспериментально наблюдать этот низкочастотный резонанс?

4) В главе 3 автор убедительно демонстрирует возможность создания чувствительного сенсора массы на базе углеродного нановискера. Однако, для измерения массы необходимо использовать сканирующий электронный микроскоп, что может затруднять применение таких сенсоров. Можно ли как-то упростить измерение резонансной частоты нановискера, например, с помощью емкостного метода детектирования колебаний. Автору стоит прокомментировать такую возможность/невозможность.

5) К сожалению, текст диссертации содержит ряд опечаток. Например:

- стр. 40 лишнее слово “методы” после “(СКМ, также известный как СМПП или SICM)”

- стр.49 вместо Рис.1 должно быть Рис.31

- в формуле (3) для потенциала Леннарда-Джонса небольшая ошибка – один из степенных показателей должен быть 6.
- на стр. 29 ошибочная нумерация формулы для длины Дебая – вместо (18) должно быть (3)
- в названии Таблицы 1 фигурирует “резонансная частота пучка”. Про какой пучок идёт речь?

Также есть общее замечание к оформлению рисунков - очень маленькие размеры цифр на шкалах и подписи шкал графиков.

Отмеченные недостатки и замечания **не влияют** на общую **положительную оценку** работы и не снижают её высокого научного уровня. Считаю, что диссертация Лукашенко Станислава Юрьевича представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, проведённое на высоком экспериментальном уровне.

Надёжность научных положений и выводов работы, их обоснованность обеспечивается квалифицированным подходом к подготовке экспериментов, выбором адекватных экспериментальных методик, тщательным анализом полученных данных, а также высоким уровнем обсуждения экспериментальных результатов. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Тематика диссертационного исследования соискателя, основные результаты и защищаемые положения полностью соответствуют паспорту специальности 1.3.2 (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”).

По своей актуальности, научной новизне, объёму и практической значимости диссертационная работа “Особенности использования СЗМ-

зондов в нанодиагностике” **полностью соответствует** требованиям пунктов 9-14 “Положения о присуждении учёных степеней” для учёной степени кандидата наук, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., в редакции от 25.01.2024 г., а её автор Лукашенко Станислав Юрьевич **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Я, Дунаевский Михаил Сергеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Лукашенко Станислава Юрьевича и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников

Старший научный сотрудник

лаборатории оптики поверхности,


Дунаевский М.С.
Дата: 17 марта 2025 г.

Подпись старшего научного сотрудника лаборатории оптики поверхности Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе, Дунаевского Михаила Сергеевича заверяю



Подпись Дунаевского М.С. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им. А.Ф.Иоффе

 , Н.С. Бузареко

Контактные данные:

Дунаевский Михаил Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

+7 (812) 292-73-17

Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru