



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А, Санкт-Петербург, 198095, а/я 140, тел.: (812) 363-07-19, факс: (812) 363-07-20
ОКПО 04699534, ОГРН 1027810289980, ИНН 7809003600, КПП 780501001, e-mail: iap@iranin.spb.su, www.iairas.ru

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИАП РАН
д.т.н. 
_____ А.А. Евстрапов
«25» сентября 2024 г.


ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН)

Диссертация Лукашенко С.Ю. «Особенности использования СЗМ зондов в нанодиагностике» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики выполнена в Института аналитического приборостроения РАН.

Соискатель Лукашенко Станислав Юрьевич в 2014 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» по специальности/направлению 200100 «Приборостроение».

С 2014 по 2018 год проходил обучение в очной аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», на кафедре Нанотехнологий и Материаловедения и, после реорганизации структуры университета, на кафедре Нанофотоники и Метаматериалов, по специальности 05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений).

В период подготовки диссертации Лукашенко С.Ю. работал в лаборатории Сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии ИАП РАН. В настоящее время работает в этой лаборатории в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель — Голубок Александр Олегович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории Сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии ИАП РАН.

По итогам рассмотрения принято следующее заключение:

1. Личный вклад соискателя заключается в ключевой роли при получении всех представленных в диссертации результатов. Все эксперименты, моделирование и расчёты проводились лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Соискатель принимал участие в выдвигании гипотез, постановке задач, предлагал пути их достижения, активно обсуждал полученные результаты, интерпретировал и обрабатывал данные.

2. Достоверность научных достижений соискателя обеспечивается корректной постановкой задач, многократным проведением экспериментов с воспроизводимыми результатами, применением современных средств и методов диагностики наноструктур, а также хорошим соответствием результатов численного моделирования и экспериментальных данных. Результаты работы были представлены на 15 конференциях, в том числе на международных.

3. Новизна выполненных исследований заключается в том, что:

- Впервые предложен и реализован резонансный детектор массы (РДМ) в виде углеродного нановискера (УНВ), выращенного на кончике вольфрамового зонда, который позволяет измерять массу субмикро- и нанообъектов в недоступном ранее диапазоне (10^{-14} - 10^{-17}) г, перспективном для взвешивания вирусов, бактерий, белков и наночастиц любой природы;

- Впервые экспериментально обнаружено, что добротность резонансных колебаний на воздухе УНВ, выращенного на кончике вольфрамового нанозонда, не уменьшается по сравнению с добротностью резонанса в вакууме. Одинаковая добротность данного РДМ как в вакууме, так и при атмосферных условиях, является принципиально важным результатом для биомедицинских задач.

- Впервые экспериментально продемонстрирована возможность закрепления золотых наночастиц на кончике углеродного нановискера с использованием V – образных наноловушек. Предложенный способ закрепления золотых наночастиц на поверхности углеродных нановискеров без дополнительных связующих веществ имеет практическую ценность при разработке методов манипулирования металлическими НЧ, функционализации их поверхности, использовании в задачах биосенсинга и т.п.

- Впервые показано, что при работе пьезорезонансного «self-sensing» зондового датчика в виде пьезотрубки с вольфрамовым нанозондом возникают связанные колебания, увеличивающие область контакта зонда с образцом и ухудшающие пространственное разрешение СЗМ. Предложен подход к уменьшению «пятна контакта» и улучшению пространственного разрешения СЗМ приборов, использующих пьезорезонансный датчик «W зонд – пьезотрубка» в режиме работы «tapping».

- Впервые предложен и использован полуэмпирический способ учёта электрохимической реакции на хлорсеребряных электродах при определении тока насыщения капиллярного нанозонда. Предложенный способ определения коэффициента преобразования ионного тока в электронный при работе с AgCl-электродами может быть использован при работе с микро- и нанофлюидными системами различного назначения

- Впервые обнаружен пик на кривой подвода в СКМ и разработана модель, объясняющая его появление. Показано, что при соотношении 1:10 концентрации водного раствора NaCl внутри капилляра и снаружи, соответственно, наблюдается 6-кратное увеличение ионного тока по сравнению с током насыщения. Понимание природы появления пика на кривой подвода в СКМ важно для построения алгоритмов устойчивой работы следящей системы.

4. Практическая значимость полученных результатов:

- разработанный автором подход перекрывает недоступный ранее для резонансных детекторов массы диапазон (10^{-14} - 10^{-17}) г характерный для вирусов, бактерий, белков и наночастиц любой природы, при этом важное практическое значение имеет возможность проводить измерение как в вакууме, так и при атмосферном давлении;

- предложенный способ «чистого» закрепления золотых наночастиц на кончике НМО имеет практическую ценность для биомедицинских задач;

- выполненное в работе моделирование колебаний W зондов и зондов-нанокапилляров СЗМ имеет очевидное практическое значение, поскольку позволяет улучшить пространственное разрешение при визуализации микро- и нанообъектов, а также быстродействие следящей системы СЗМ за счёт уменьшения времени стабилизации взаимодействия между зондом и образцом;

- на основании выполненных экспериментов и моделирования предложен способ расчёта тока насыщения с точностью 5%, протекающего через наноапертуру зонда-нанокапилляра, а также качественно и количественно описано возникновение пика на кривой подвода в сканирующем микроскопе ионной

проводимости, что может быть использовано как для определения диаметра наноапертуры, так и при разработке нанокapиллярных систем с адаптивным изменением размеров наноканала.

5. Диссертация соответствует научной специальности: 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики», а также требованиям, установленным пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с учетом изменений и дополнений до 25 января 2024 г. включительно).

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

Основное содержание диссертации опубликовано в 16 печатных трудах, рецензируемых Web of Science, Scopus и РИНЦ. Материалы диссертации изложены в работах соискателя [1 —16] В работах [1,2] диссертантом представлены результаты экспериментов по возбуждению механических резонансных колебаний W игл и моделированию пьезорезонансного СЗМ датчика с W зондами, для которого предложены способы устранения «паразитных» колебаний вершины зонда. В работах [2-4] описан метод создания УНВ на вершине W зондов, и методика измерения амплитудно-частотных характеристик НМО с помощью сканирующего электронного микроскопа. В работе [5] представлены экспериментальные результаты по измерению модуля Юнга УНВ динамическим и статическим методом. В работах [6,7] приведены результаты измерения добротности НМО на основе УНВ в вакууме и при атмосферном давлении. В работе [8,9] описан РДМ на основе УНВ и предложен метод закрепления золотых наночастиц на кончике НМО с помощью углеродных V – образных наноловушек без дополнительных связующих веществ. В работах [10-16] описаны особенности применения стеклянных нанопипеток при работе в СКМ.

Список статей, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, РИНЦ, в которых содержатся основные результаты диссертации:

1. S.Yu. Lukashenko, O.M. Gorbenko I.D. Sapozhnikov, M.V. Zhukov, M. L. Felshtyn, S. V. Pichakhchi, A. O. Golubok On the Spatial Resolution of a Piezoresonance Probe Sensor with a Tungsten Needle // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques, 2023, 17(3):578-58.

2. S.Yu. Lukashenko, V.V. Lysak, I.D. Sapozhnikov, I.S. Mukhin, A.O. Golubok Study of micro-and nanomechanical oscillators based on crystalline W and amorphous C whiskers // AIP Conference Proceedings 2015, 643, 1, 012114.

3. Горбенко О.М., Фельштын М.Л., **Лукашенко С.Ю.**, Голубок А.О., Сапожников И.Д. Измерение амплитудно-частотных характеристик наномеханических

осцилляторов путем визуализации их колебаний в сканирующем электронном микроскопе // Научное приборостроение – 2018. – Том 28. – Номер 3 С. 109-117.

4. **S.Lukashenko**, I.Mukhin, O.Gorbenko, G.Larionenko, I.Sapozhnikov, M.Felshtyn, A.Golubok, Visualization of Complex Oscillations of Carbon Nanowhiskers in SEM AIP Conference Proceedings 2064, 020002 (2019).

5. **S.Y. Lukashenko**, M.V. Zhukov, I.S. Mukhin, I.D. Sapozhnikov, A.O. Golubok Measurement of the Young's modulus of amorphous carbon nanowhisiker by static and dynamic method // AIP Conference Proceedings 2017, 1874, 1, 040025.

6. **Lukashenko S.Y.**, Golubok A.O., Mukhin I.S., Veniaminov A.V., Sapozhnikov I.D., Lysak V.V. Q-factor study of nanomechanical system "metal tip - carbon nanowhisiker" at low and ambient pressure // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science 2016, 213, 9, 2375-2379.

7. **S.Lukashenko**, I.Mukhin, A.Veniaminov, I.Sapozhnikov, A.Mozharov, D.Kupriyanov, A.Golubok Investigation of nanomechanical oscillators based on amorphous carbon whiskers in vacuum and at ambient pressure // Journal of Physics: Conference Series 769 (2016) 012062.

8. **S.Yu. Lukashenko**, I.S. Mukhin, F.E. Komissarenko, O.M. Gorbenko, I.D. Sapozhnikov, M.L. Felshtyn, A.O. Golubok Resonant Mass Detector Based on Carbon Nanowhiskers with Traps for Nanoobjects Weighing // Physica status solidi (a) 2018, 215, 21, 1800046.

9. **Lukashenko S.Y.**, Golubok A.O., Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Sapozhnikov I.D., Veniaminov A.V., Lisak V. Precise mass detector based on carbon nanooscillator // AIP Conference Proceedings 2016, 1748, 050002.

10. M.V. Zhukov, **S.Yu. Lukashenko**, I.D. Sapozhnikov, A.O. Golubok Creation and study of liquid nanojunction using SPM-base technology // Journal of Physics: Conference Series 2020, 1695, 1, 012167.

11. M.V. Zhukov, **S.Y. Lukashenko**, I.D. Sapozhnikov, A.O. Golubok, V.I. Chubinskiy-Nadezhdin, F.E. Komissarenko, Scanning ion-conductance and atomic force microscope with specialized sphere-shaped nanopipettes // Journal of Physics: Conference Series 2017, 917, 4, 042022.

12. M.V. Zhukov, **S.Yu. Lukashenko**, I.D. Sapozhnikov, M.L. Felshtyn, O.M. Gorbenko, A.O. Golubok Scanning ion-conductance microscope with modulation of the sample position along the Z-coordinate and separate Z-axial and lateral (X, Y) scanning // Journal of Physics: Conference Series 2021, 2086, 1, 012074.

13. M.V. Zhukov, **S.Yu. Lukashenko**, I.D. Sapozhnikov, M.L. Felshtyn, O.M. Gorbenko, S.V. Pichakhchi, A.O. Golubok Multimode scanning ion conduction microscope with piezo-inertial moving system // Nauchnoe priborostroeniye 2022, 32, 4, 68-87.

14. Жуков М.В., Горбенко О.М., **Лукашенко С.Ю.**, Сапожников И.Д., Фельштын М.Л., Пичахчи С.В., Голубок А.О. Влияние поверхностного заряда на ионную

проводимость электролита в наноканале // ФТТ, 2023, том 65, вып. 12 стр 2208 – 2211.

15. S.Yu. Lukashenko, O.M. Gorbenko, M.V. Zhukov, S.V. Pichahchi, I.D. Sapozhnikov, M.L. Felshtyn, A.O. Golubok Behavioral Features of the Approach Curve of a Scanning Ion-Conductance Microscope // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron 2023 17, 3, 585-591.


16. С.В. Пичахчи, О.М. Горбенко, С.Ю. Лукашенко, М.Л. Фельштын. И.Д. Сапожников, И.С. Свайкин, А.О. Голубок Уменьшение времени получения изображения в сканирующем микроскопе ионных токов в "hopping"-моде // Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 20, 48-51

Диссертация «Особенности использования СЗМ зондов в нанодиагностике» Лукашенко Станислава Юрьевича соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ N: 842 от 24 09.2013 г. (с учетом изменений и дополнений до 25 января 2024 г. включительно) и пунктам 1 и 8 Паспорта специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики область знаний Физико-математические науки, а именно, «Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики», «Разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента» и «Моделирование физических явлений и процессов».

Диссертация Лукашенко Станислава Юрьевича «Особенности использования СЗМ зондов в нанодиагностике» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Заключение подготовлено на заседании Объединенного научного семинара Института аналитического приборостроения РАН (протокол № 6 от 12 сентября 2024 г.).

Председатель семинара

главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.  Явор М.И.

Секретарь

вед. инспектор канцелярии  Хорошавина Л.П.