ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 29.10.2024 №59

О присуждении Ильиной Марине Владимировне ученой степенидоктора физико-математических наук.

Диссертация «Разработка физико-технологических основ создания устройств нанопьезотроники на основе ориентированных углеродных нанотрубок»в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» принята к защите 4 июля 2024 года, протокол № 39 диссертационным советом 24.2.326.07, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек приказом от 26.01.2023 (№ 86/нк).

Соискатель Ильина Марина Владимировна, 31.07.1989 года рождения, гражданка Российской Федерации. В 2012 году соискатель окончила ФГАОУ ВО «ЮФУ», присуждена степень магистра техники и технологии по направлению «Нанотехнология». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка и исследование конструктивно-технологических основ создания мемристорных структур на вертикально ориентированных углеродных нанотрубках» по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах» защитила в 2016 году в диссертационном совете, созданном на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» (ФГАОУ ВО «ЮФУ»). Ученое звание доцента присвоено в 2024 году по специальности «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств». В настоящее время работает в должности доцента кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «ЮФУ».

Диссертация выполнена на кафедре нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

**Научный консультант** – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор Агеев Олег Алексеевич, ФГАОУ ВО «ЮФУ», кафедра нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения, профессор.

**Официальные оппоненты**:

1. Светухин Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-производственный комплекс «Технологический центр», директор;

2. Образцов Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, профессор;

3. Бобринецкий Иван Иванович, доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «ГрафАпта», главный научный сотрудник

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ») **в своем положительном отзыве**, составленном Тепловым Геннадием Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, ученым секретарем научно-технического совета АО «НИИМЭ», и утвержденном А.С. Кравцовым, кандидатом технических наук, генеральным директором АО «НИИМЭ», указала, что диссертационная работа была рассмотрена и получила положительную оценку на заседании секции №1 НТС АО «НИИМЭ» (протокол № 2с1-10/24 от 03.10.2024), представленные результаты имеют научную новизну и практическую значимость, и могут быть квалифицированы как научное достижение, состоящее в обнаружении и исследовании новых эффектов в углеродных нанотрубках, обладающих практической значимостью для разработки перспективных устройств наноэлектроники, в частности нанопьезотроники; автореферат диссертации полностью отражает её содержание; тема диссертационной работы, ее содержание, цель, постановка задач и методы их решения, а также полученные автором результаты и их анализ соответствуют паспорту специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств»; диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, а её автор заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Соискатель имеет 41 опубликованную работу в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в международные базы данных (из них 30 опубликованных работ в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, 2 патента РФ на полезную модель), основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в 39 научных статьях, вклад соискателя в которые является определяющим. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на более 20 всероссийских и международных конференциях. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Il'ina, M.V. Pyrrole-like defects as origin of piezoelectric effect in nitrogen-doped carbon nanotubes / Il'ina M.V., Il'in O.I., Osotova O.I., Khubezhov S.A, Rudyk N.N., Pankov I.V., Fedotov A.A., Ageev O.A. // Carbon. – 2022. –V. 190. – P. 348-358.
2. Il'ina, M.V. Anomalous piezoelectricity and conductivity in aligned carbon nanotubes / Il'ina M.V., Il'in O.I., Guryanov A.V., Osotova O.I., Blinov Yu.F., Fedotov A.A., Ageev O.A. // Journal of Materials Chemistry C. – 2021. – V. 9. – P. 6014 – 6021.
3. Il'ina, M.V. Analysis of the Piezoelectric Properties of Aligned Multi-Walled Carbon Nanotubes / Il'ina M.V., Il'in O.I., Rudyk N.N., Osotova O.I., Fedotov A.A., Ageev O.A. // Nanomaterials. – 2021. – V. 1(11). – P. 2912.
4. Il'ina, M.V. Memristors based on strained multi-walled carbon nanotubes / Il'ina M.V., Il'in O.I., Osotova O.I., Smirnov V.A., Ageev O.A. // Diam. Relat. Mater. – 2022. – V. 123. – P. 108858.
5. Il’ina, M.V. Sublayer material as a critical factor of piezoelectric response in nitrogen-doped carbon nanotubes / Il’ina, M.V., Osotova O.I., Rudyk N.N., Khubezhov S.A, Pankov I.V., Ageev O.A., Il'in O.I. // Diam. Relat. Mater. – 2022. – V. 126. – P. 109069
6. Il'ina, M.V. Memristive switching mechanism of vertically alignedcarbon nanotubes / Il'ina M.V., Il'in O.I., Blinov Yu.F., Smirnov V.A., Kolomiytsev A.S., FedotovA.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. // Carbon. – 2017. – V. 123. – pp. 514-524.
7. Il’in, O.I. Modeling of catalytic centers formation processes during annealing of multilayer nanosized metal films for carbon nanotubes growth / Il’in O.I., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Il'ina M.V., Cherednichenko D.I., AgeevO.A. // Nanomaterials. – 2020. – V. 10(3). – P. 554.
8. Il’ina, M.V. Piezoelectric Response of Multi-Walled Carbon Nanotubes / Il’ina, M.V., Il’in O.I., Blinov Y.F., Konshin A.A., Konoplev B.G., Ageev O.A. // Materials. – 2018. – V. 11. – P. 638.
9. Il’ina, M.V. Influence of the aspect ratio of nitrogen-doped carbon nanotubes on theirpiezoelectric properties / Il’ina M.V., Soboleva O.I., Rudyk N.N., Polyvianova M.R., Khubezhov S.A, Il'in O.I. // J. Adv. Dielectr. – 2022. – V. 2241001. P. 1–7.
10. Il'in, O.I. Effect of the sublayer material on geometric dimensions and piezoelectric response of vertically aligned carbon nanotubes / Il'in O.I., Il'ina M.V., Rudyk N.N., Polyvyanova O.R., Saenko A.V., FedotovA.A. // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2022. – V. 30 (1). P. 185-190.
11. Il'ina, M.V. Comparison of the synchrotron and laboratory X‐ray sources in the photoelectron spectroscopy experiments for the study of nitrogen‐doped carbon nanotubes / Il'ina M.V., Khubezov S.A., Polyvianova M.R., Il'in O.I., Dedkov Y.// Quantum Beam Sci. – 2023. – V. 7(3). – P. 25.
12. Il’ina, M.V. Dependence of the memristor effect of carbon nanotube bundles on the pressing force / Il’ina M.V., Il’in O.I., Guryanov A.V., Osotova O.I., Ageev O.A.// Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2020. – V. 28 (1). – P. 78-82.
13. Il’ina, M.V. Study of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for Creation of Piezoelectric Nanogenerator / Il’ina M.V., Soboleva O.I., Khubezov S.A., Smirnov V.A., Il’in O.I. // J. Low Power Electron. Appl. – 2023. –V. 13. –№ 1. – P. 11.
14. Soboleva, O.I. Piezoelectric properties of nitrogen-doped carbon nanotubes grown on refractory metal electrodes / Soboleva O.I., Khubezhov S.A., Polyvianova M.R., Il'in O.I., Il'ina M.V. // Russian Microelectronics. – 2023. – V. 52. – Suppl. 1. – P. S139–S144.
15. Il’ina, M.V. Nitrogen-doped carbon nanotubes as a promising material for the creation of piezoelectric nanogenerators // Nanobiotechnology Reports. – 2024. – V. 19. – No.1. – P. 31-36.
16. Ильина, М.В. Исследование влияния температуры роста на свойства легированных азотом углеродных нанотрубок для создания устройств нанопьезотроники / Ильина М.В., Рудык Н.Н., Соболева О.И., Полывянова М.Р., Хубежов С.А., Ильин О.И. // Журнал технической физики. – 2023. – том 93. – №. 7. – с. 936 – 942.
17. Ильина, М.В. Характеризация вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом силовой микроскопии пьезоотклика / Ильина М.В., Соболева О.И., Полывянова М.Р., Селиванова Д.И., Хубежов С.А., Ильин О.И. // Известия РАН. Серия физическая. – 2023. – Т. 87. – №. 10. – с. 1397 – 1403.
18. Соболева, О.И. Влияние времени активации на пьезоэлектрические свойства легированных азотом углеродных нанотрубок / Соболева О.И., Полывянова М.Р., Ильин О.И., Ильина М.В. // Нано- и микросистемная техника. – 2023. – Т. 25. – № 3. – с. 99 – 104.
19. Il’ina, M.V. Study of the piezoelectric properties of nitrogen-doped carbon nanotubes for the development of energy-efficient nanogenerators / Il’ina M.V., Soboleva O.I., Polyvianova M.R., Khubezov S.A., Il’in O.I. // Nanobiotechnology Reports. – 2023. – V. 18. – No. 6. – P. 858–864.
20. Ильина М.В., Ильин О.И., Осотова О.И., Хубежов С.А., Агеев О.А.Мемристивный эффект в легированных азотом углеродных нанотрубках // Российские нанотехнологии. 2021. V. 16, № 6. с. 857–864.
21. Рудык, Н.Н. Влияние параметров метода PECVD на рост углеродных нанотрубок для устройств нанопьезотроники / Рудык Н.Н., Ильина М.В., Ильин О.И., Хубежов С.А., Федотов А.А., Агеев О.А. // Журнал технической физики. – 2021. – V. 91. – № 10. – C. 1517 – 1523.
22. Ильина, М.В. Неравномерная упругая деформация и мемристорный эффект в ориентированных углеродных нанотрубках / Ильина М.В., Ильин О.И, Блинов Ю.Ф., Смирнов В.А., Агеев О.А. // Журнал технической физики. – 2018. – V. 88. – № 11. C. 1726 – 1733.
23. Ильина, М.В. Модель эффекта резистивного переключения в неравномерно деформированной углеродной нанотрубке / Ильина М.В., Блинов. Ю.Ф., Ильин О.И., Гурьянов А.В., Агеев О.А.// Известия РАН. Серия физическая – 2017 – Т. 81 –№ 12, – C. 1681–1685.
24. Ильина, М.В. Наногенератор на основе вертикальноориентированных углеродных нанотрубок/ Ильина М.В., Осотова О.И. // Патент РФ на полезную модель № 211606 от 15.06.2022 г.
25. Ильина, М.В. Пьезоэлектрический наногенератор на основе двух массивов вертикально ориентированных углеродных нанотрубок / Ильина М.В., Соболева О.И., Ильин О.И., Полывянова М.Р. // Патент РФ на полезную модель № 221988 от 12.10.2023 г.

На автореферат диссертации поступило 10 отзывов, **все отзывы положительные**:

1. От Филатова Сергея Александровича, кандидата технических наук, заместителя заведующего отделением теплообмена и механики микро- и наноразмерных систем Института тепло- и массобмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. Замечаний нет. Отмечается, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне.

2. От Подъячевой Ольги Юрьевны, доктора химических наук, ведущего научного сотрудника отдела гетерогенного катализа ФГБУН «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН». В отзыве присутствуют замечания:

а) В работе делается вывод о связи пьезоэлектрических свойств N-УНТ с бамбукоподобной структурой трубок, которая формируется вследствие встраивания азота в графеновый слой в пиррольные позиции. В качестве доказательства приводятся экспериментальные данные величин пьезоэлектрического модуля d33 для серий образцов с различными характеристиками (рис. 10-13). Автор анализирует вклад (%) различных форм азота, однако, при этом общее содержание азота в образцах может различаться в значительной степени (например, 2.37 и 11.47 ат.%). В этой связи, наблюдается ли прямая зависимость между d33 и концентрацией пиррольного азота в ат.% для серий образцов?

б) На стр. 28 автор пишет «При этом показано, что дефектность N-УНТ, определяемая как отношение интенсивностей D- и G-пиков спектров КРС, линейно увеличивалась от 0,75 до 0,84 с увеличением пьезоэлектрического модуля от 38,5 до 143,5 пм/В, соответственно, что позволяет говорить о зависимости значения HRS/LRS от дефектности нанотрубок». На сколько значима разница полученных значений D/G и какова ошибка определения D/G?

в) Автор для достижения цели сформулировал 12 задач, некоторые из них являются частными случаями, которые можно было объединить в более общие задачи.

г) Текст автореферата содержит опечатки.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

3. От Лукичева Владимира Федоровича, доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН, директора ФГБУН «Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук» (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН)). В отзыве присутствуют следующие замечания:

а) из текста автореферата остается неясным, каким образом диаметр и длина N-УHT влияют на величину потенциального барьера на границе боковой стенки с бамбукообразными перемычками;

б) на рисунке 20 автореферата в области отрицательных напряжений N-УHT практически не проводит ток. Чем обусловлен данный эффект?

Указано, что в работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие устройств на основе углеродных нанотрубок.

4. От Герасименко Александра Юрьевича, доктора технических наук, доцента, профессора Института биомедицинских систем, начальника научно-исследовательской лаборатории «Биомедицинские нанотехнологии» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники». В отзыве присутствуют замечания:

а) Из текста автореферата остается не ясен механизм влияния материла подслоя массива ориентированных N-УНТ на их пьезоэлектрические свойства. Как учитывалось взаимодействие материла подслоя с технологическими газами ацетилена и аммиака в процессе роста нанотрубок?

б) Не представлены результаты сравнения выходных параметров ячейки энергонезависимой памяти на основе N-УНТ с мемристорами на основе оксидов металлов, что не дает возможность оценить преимущества использования N-УНТ при разработке энергонезависимой памяти.

При этом, отмечено, что в работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны в области электронной техники. Отмечается, что результаты работы представляют на только научный интерес, но и практическую значимость.

5. От Бескачко Валерия Петровича, доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры «Физика низкоразмерных систем» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет)» и Созыкина Сергея Анатольевича, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры «Физика низкоразмерных систем» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет)». Сделаны следующие замечания:

а) На рис. 1 автореферата (и рисунке 2.3 диссертации) изображены «регибридизованные π-орбитали». Смысл этого термина не ясен, так как π-орбитали sp2 углерода образованы негибридизированными p-орбиталями. В чем заключается гибридизация и почему она «регибридизация»?

б) На рисунке 1 автореферата изображена схематическая структура бамбукообразных нано-трубок. Существует альтернативная схема бамбукообразных нанотрубок, приведенная, например, в работе https://doi.org/10.1016/S0009-2614(00)01431-7. Какая из схем ближе к реальности?

в) На странице 16 автореферата говорится о «контролируемом заполнении электронами π-орбиталей бамбукообразных перемычек». Как это понимать? На π-орбиталях нанотрубок уже находятся электроны.

г) На стр. 12 приводятся параметры исследованной автором конечно-элементной модели нанотрубки. Неясно, из каких соображений выбирались величины пьезоэлектрических коэффициентов, а также частоты и амплитуды вынуждающей силы при анализе вибраций (1 Гц). Собственные частоты колебаний нанотрубок примерно на 10 порядков выше, так что расчеты фактически сделаны в статическом режиме нагружения.

д) На той же странице в следующем абзаце обсуждается распределение электрического потенциала, возникающее вследствие осевого растяжения трубки. Модель по всей видимости обладает цилиндрической симметрией и поэтому непонятно, в чем причина нарушения этой симметрии, выражающаяся в «неравномерной деформации» и тяготении распределения потенциала к левой стороне трубки (на рисунке). «На глаз» разница потенциалов между левым и правым верхними углами рисунка составляет около 0.2 В.

Указано, что сделанные замечания носят частный характер и не снижают научной ценности и достоинств диссертационной работы.

6. От Спивак Юлии Михайловны, доктора технических наук, доцента, доцента кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). В отзыве присутствуют следующие замечания:

а) в предложенной автором модели процесса возникновения пьезоэлектрического отклика в легированной азотом УНТ под действием внешних воздействий присутствует флексоэлектрический коэффициент. Однако из текста автореферата не ясно, на сколько влияет флексоэлектрическая компонента на величину пьезоэлектрического отклика УНТ в целом.

б) в автореферате не представлены результаты воспроизводимости резистивного переключения по массиву УНТ. Проводились ли такие исследования и как изменялось отношение HRS/LRS для разных УНТ в массиве?

в) в автореферате имеются опечатки.

Указано, что сделанные замечания не снижают научной и практической ценности представленной диссертационной работы.

7. От Тетельбаум Давида Исааковича, доктора физико-математических наук, профессора, ведущего научного сотрудника Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. В отзыве присутствуют замечания:

а) На рисунках 11 и 13 представлены зависимости пьезоэлектрического модуля N-УНТ от концентрации азота пиррольного типа в атомных процентах. Однако остается не понятным, какие минимальные и максимальные степени легирования азотом допустимы для наблюдения пьезоэлектрического эффекта в N-УНТ?

б) В тексте автореферата отсутствует информация по оценке быстродействия мемристора на основе N-УНТ. Проводились ли исследования данного параметра?

Отмечено, что диссертационная работа является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области исследования углеродных нанотрубок и разработки устройств на их основе.

8. От Быкова Виктора Александровича, доктора технических наук, почетного президента группы компаний «НТ-МДТ Спектрум Инструментс». В качестве замечания отмечено, что можно было уделить несколько большее внимание использованию дополнительных, новых методов атомно-силовой микроскопии, т.н. методам гибридных мод, что позволяет глубже раскрыть структурные особенности нанообъектов. Указанное замечание не влияет на общую оценку диссертационной работы.

9. От Демина Вячеслава Александровича, доктора физико-математических наук, первого заместителя руководителя по научной работе Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт». В качестве замечаний отмечено следующее:

а) в автореферате представлены значения только компоненты d33 пьезоэлектрического модуля N-УНТ. Не ясно, оценивались ли значения модуля по другим кристаллографическим направлениям, например, d31;

б) из текста автореферата не до конца понятно, чем обусловлено существенное увеличение значения HRS/LRS при деформации N-УНТ величиной около 60 нм (рис. 26,б).

Указано, что диссертационная работа является законченной научно-исследовательской работой, а данные замечания не снижают ценности и практической значимости диссертационной работы.

10. От Сударь Николая Тобисовича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. В качестве замечания отмечено, что в автореферате отсутствует точная информация о том, какой тип УНТ (одностенные или многостенные) использовался в исследованиях. Возник вопрос можно ли аналогичные эффекты обнаружить в многостенных УНТ. Отмечается, что данное замечание не снижает общей положительной оценки диссертационной работы и ее научной и практической значимости.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их высокой профессиональной квалификацией и наличием признанных достижений в областях, соответствующих тематике представляемой работы.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**выдвинута** и впоследствии доказана новая научная идея, связанная с обнаружением пьезоэлектрического эффекта в легированных азотом углеродных нанотрубках (N-УНТ) и разработкой устройств нанопьезотроники на их основе; **предложены** механизм возникновения аномального пьезоэлектрического эффекта в N-УНТ и механизм многоуровневого резистивного переключения в деформированной N-УНТ под действием внешнего электрического поля; **доказано,** что N-УНТ способны преобразовывать нано- и микроразмерные деформации и вибрации в поверхностный потенциал и соответствующий ему электрический ток, а также накапливать пьезоэлектрический заряд по аналогии с конденсатором; **введены** новые представления о возможности использования углеродных нанотрубках в наноэлектронике, в частности для устройств нанопьезотроники, которые позволяют перейти к реализации нового подхода при создании автономных источников питания и элементов энергонезависимой памяти на основе N-УНТ.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

**доказано**, что легированная азотом углеродная нанотрубка обладает пьезоэлектрическим эффектом и представляет собой аналог домена с преимущественным направлением поляризации вдоль оси нанотрубки, что вносит вклад в расширение представлений о свойствах и эффектах в углеродных нанотрубках, вызванных легированием азотом и формированием бамбукообразных дефектов,

**применительно к проблематике диссертации результативно использован** комплекс современных методов исследования структуры и физико-механических свойств наноразмерных структур (включая просвечивающую и сканирующую электронную микроскопию, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, силовую микроскопию пьезоотклика и др.),

**изложены** доказательства возможности контролируемой модификации пьезоэлектрических свойств углеродных нанотрубок путем встраивания азота пиррольного типа в процессе роста методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (ПХОГФ),

**раскрыты** теоретические закономерности влияния типа механического воздействия (сжатия, растяжения, изгиба и вибрации) и величины длины и диаметра N-УНТ на распределение поверхностного потенциала в N-УНТ с учетом наличия бамбукообразных «перемычек», позволившие установить эффект формирования потенциального барьера на границах бамбукообразных «перемычек» с боковой стенкой N-УНТ, величиной и знаком которого можно управлять путем выбора типа и величины деформации,

**изучены** закономерности влияния геометрических параметров N-УНТ на их пьезоэлектрический модуль. Показано, что с увеличением аспектного отношения длины к диаметру N-УНТ от 7 до 30 величина пьезоэлектрического модуля увеличивается линейно, при дальнейшем увеличении аспектного отношения N-УНТ увеличение пьезоэлектрического модуля уходит в насыщение.

Научные исследования соискателя были поддержаны грантами Российского научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований, стипендией Президента РФ по приоритетным направлениям, а также удостоены премии молодым ученым федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», занимающимся научной и инновационной деятельностью.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики**

**подтверждается тем, что**: **разработаны** физические основы создания устройств нанопьезотроники на основе ориентированных N-УНТ, работоспособность которых продемонстрирована на примере макетов наногенератора и элемента энергонезависимой памяти; имеются **акты внедрения** этих разработок в научных и производственных организациях РФ (АО "НЗПП Восток" (г. Новосибирск), АО «НИИ НПО «Луч» (г. Подольск), ООО «Поликетон» (г. Нижний Новгород), ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий» («МЦКТ», г. Москва)) и получено письмо поддержки от АО «НИИграфит» имени С.Е. Вяткина (г. Москва), отражающее актуальность и востребованность результатов диссертации в области разработки углеродных материалов и изделий на их основе. Кроме того, проект по разработке физико-технологических основ создания наногенераторов на основе флексо- и пьезоэлектрических эффектов в ориентированных углеродных нанотрубках, руководителем которого является Ильина М.В., поддержан для включения в «дорожную карту» развития РФ высокотехнологических областей «Технологии новых материалов и веществ».

**Определены** режимы роста N-УНТ методом ПХОГФ (значения температуры, толщины каталитического слоя, соотношения технологических потоков газов, материала подслоя), позволяющие эффективно управлять концентрацией азота пиррольного типа в N-УНТ и величиной пьезоэлектрического модуля N-УНТ от 30 до 119 пм/В, а также закономерности влияния параметров N-УНТ (дефектности, пьезоэлектрического модуля, величины деформации) и внешнего воздействия (формы и амплитуды импульса, вакуума, материала верхнего электрода) на отношение сопротивлений N-УНТ в высокоомном и низкоомном состояниях в процессе резистивного переключения.

**Разработаны** совместимые с существующей кремниевой технологией технологические маршруты формирования пьезоэлектрических наногенераторов (ПЭНГ) на основе массива вертикально ориентированных N-УНТ с верхним профилированным и плоским перфорированным электродами. Предложены конструкции ПЭНГ на основе массива вертикально ориентированных N-УНТ с верхним профилированным и плоским перфорированным электродами. На конструкции ПЭНГ получено 2 патента РФ. Разработанные конструкции позволяют сформировать ПЭНГ на основе вертикально ориентированных N-УНТ с плотностью упаковки до 100 мкм-2, способные преобразовывать наноразмерные механические деформации и вибрации в электрическую энергию. По сравнению с аналогичными устройствами, ПЭНГ на основе вертикально ориентированных N-УНТ позволит повысить энергоэффективность до единиц мВ/нм путем повышения плотности упаковки пьезоэлементов до 100 мкм-2 и повышения выходной мощности на единицу площади до 10 мВт/см2 за счет повышения генерируемого тока.

**Представлены** результаты исследования выходных параметров макета ПЭНГ на основе массива вертикально ориентированных N-УНТ с верхним профилированным электродом, подтверждающие возможность преобразования внешних вибраций в напряжение в ПЭНГ на основе массива вертикально ориентированных N-УНТ, и макета ячейки памяти на основе мемристора с N-УНТ, подтверждающие перспективность применения N-УНТ для создания элементов резистивной памяти.

Таким образом, диссертационная работа Ильиной М.В. вносит обширный научный вклад в общее понимание пьезоэлектрического эффекта и эффекта резистивного переключения в углеродных нанотрубках, что имеет важное значение как с научной, так и с практической точки зрения.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила**, что **экспериментальные результаты получены** с применением современных методов исследования на сертифицированном научно-исследовательском оборудовании; **теория построена** на проверяемых и воспроизводимых фактах; идея базируется на анализе и обобщении современных литературных источников по теме пьезоэлектрического эффекта в углеродных наноструктурах; **использовано** сравнение данных работы с результатами исследований других авторов по тематике диссертации.

**Личный вклад соискателя состоит** в постановке задач, установлении механизмов, анализе и интерпретация всех теоретических и экспериментальных результатов исследований, формулировке основных выводов, разработке конструкций и технологических маршрутов. Изготовление экспериментальных образцов N-УНТ выполнено О.И. Ильиным, Н.Н. Рудыком и А.А. Федотовым, ЮФУ. Измерения NУНТ методами атомно-силовой микроскопии выполнены лично автором или под его непосредственным руководством студентами кафедры нанотехнологий и микросистемной техники ЮФУ О.И. Соболевой (Осотовой), М.Р. Полывяновой, А.В. Гурьяновым и А.А. Коньшиным. Измерения N-УНТ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии выполнено С.А. Хубежовым, СОГУ им. К.Л. Хетагурова и Ю. Дедковым, Шанхайский университет, методом просвечивающей электронной микроскопии – И.В. Панковым, ЮФУ, методом растровой электронной микроскопии – О.И. Ильиным и А.С. Коломийцевым, ЮФУ. На все работы, выполненные в соавторстве, в диссертации даны соответствующие ссылки. Все представленные выводы и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. На все работы, выполненные в соавторстве, даны соответствующие ссылки в автореферате

В обсуждении диссертационной работы приняли участие: д.ф.-м.н. Грановский А.Б., д.ф.-м.н. Блантер М.С., д.ф.-м.н. Фетисов Ю.К., д.ф.-м.н. Образцов А.Н., д.ф.-м.н. Мишина Е.Д., д.ф.-м.н. Пасечник С.В. Были высказаны следующие критические замечания: о необходимости оценки стабильности резистивного переключения в N-УНТ более чем 500 циклов измерения; о возможности рассмотрения движения электронов в бамбукообразных «перемычках» N-УНТ с использованием подходов квантовой механики, а не классической физики; по влиянию температуры нагрева на свойства N-УНТ и разбросу геометрических параметров N-УНТ на выходные параметры изготовленных макетов. Соискатель Ильина М.В. ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы, в большинстве случаев привел собственную аргументацию, с рядом замечаний согласился.

В результате Диссертационный совет пришел к заключению, что диссертация Ильиной Марины Владимировны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук согласно пп. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (физико-математические науки), в которой описаны новые научные знания о свойствах и эффектах в углеродных нанотрубках, вызванных легированием азотом и формированием бамбукообразных дефектов, и решены важные задачи, имеющие как теоретическое, так и практическое значение для развития микро- и наноэлектроники на основе углеродных нанотрубок.

На заседании 29.10.2024 диссертационный совет принял решение: за обнаружение аномального пьезоэлектрического эффекта в легированных азотом углеродных нанотрубках, его экспериментальное и теоретическое обоснование, расширение представлений о свойствах и эффектах в углеродных нанотрубках, установление закономерностей контролируемой модификации пьезоэлектрических свойств углеродных нанотрубок, разработку и создание устройств нанопьезотроники на их основе, что в совокупности можно квалифицировать как крупное научное достижение, присудить Ильиной Марине Владимировне ученую степеньдоктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – 16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней нет.

Председатель

диссертационного совета А.С. Сигов

Ученый секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

29.10.2024 г.