ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 19 июня 2025 г. № 6

О присуждении Чумаку Максиму Александровичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Влияние оксидных покрытий на полевые эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок» по специальности 1.3.5 – «физическая электроника» принята к защите 3 апреля 2025 г., протокол № 3, диссертационным советом ФТИ 34.01.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 02.01-02-054 от 20.03.2025, № 223 от 18.12.2023, № 177 от 11.10.2023, № 28 от 16.02.2023, № 41 от 25.02.2022, № 13 от 09.02.2021 об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.03 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Чумак Максим Александрович, 22 мая 1994 года рождения, в 2018 году с отличием окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки 22.04.01 «материаловедение и технологии материалов». В 2022 году окончил аспирантуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению 28.06.01 - «Нанотехнологии и наноматериалы». Кандидатские экзамены успешно сданы соискателем по дисциплинам «История и философия науки» в 2019 году и «Иностранный язык» в 2020 году. В 2024 году соискатель был прикреплен для сдачи экзамена по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника» в аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе и успешно его сдал в этом же году. В

настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Попов Евгений Олегович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник циклотронной лаборатории ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Егоров Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой моделирования электромеханических и компьютерных систем СПбГУ, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

2. Шешин Евгений Павлович, доктор физико-математических наук, заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники МФТИ, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания. Отзыв подготовили Комков Олег Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники и Александрова Ольга Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент, секретарь кафедры микро- и нанoeлектроники. Отзыв утвердил проректор по научной и инновационной деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доктор технических наук Семенов Александр Анатольевич.

В отзыве ведущей организации указано, что автореферат диссертации полностью отражает ее основное содержание. Результаты данного исследования могут способствовать улучшению понимания фундаментальных аспектов электронных явлений в нанобъектах и привести к разработке новых типов катодов пригодных для практического применения. Диссертация Чумака М.А. «Влияние оксидных покрытий на полевые эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок» представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, тема которой актуальна для науки и практики, а результаты значимы для оптимизации нанокompозитных катодных структур и отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. "Физическая электроника" согласно Положению о присуждении ученых

степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Чумак Максим Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ведет активные исследования в области физической электроники. В состав института входят подразделения (кафедра микро-и наноэлектроники, кафедра физической электроники) тематика исследования которых близка к теме диссертации. Кроме того, в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 11 публикациях, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus:

- Ali I., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Chumak M. A. (синтез углеродных нанотрубок, характеристика структуры, подготовка публикации), Nashchekin A.V., Likhachev K. V., Imanova G., Kurniawan T. A., Habila M. A. Facile microwave synthesis of multi-walled carbon nanotubes for modification of elastomer used as heaters //Polymer Engineering & Science. – 2023. – Т. 63. – №. 12. – С. 3975-3985. DOI: 10.1002/pen.26498, Scopus ID: 2-s2.0-85171657296. WOS: 001067550800001.
- Ali I., Imanova G., Shchegolkov A. V., Chumak M. A. (синтез углеродных нанотрубок, характеристика структуры, подготовка публикации), Shchegolkov A. V., Kaminskii V.V., Kurniawan T. A., Habila M. A. Organosilicon elastomers of MWCNTs and nano-sized metals for heating purposes //Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2024. – С. 1-11. DOI: 10.1080/1536383X.2024.2321304, Scopus ID: 2-s2.0-85186566589. WOS: 001170197200001.
- Ali I., Chumak M.A. (синтез углеродных нанотрубок, полевые эмиссионные испытания, анализ результатов, подготовка публикации), Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., Kaminskii V.V., Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Kurniawan T.A., Habila M.A.

Innovative multiwall carbon nanotubes synthesis on 3D nickel surface: a comparative study //Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2024. – Т. 32. – №. 8. – С. 774-782. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2024.2328239>. Scopus ID: 2-s2.0-85188572468, WOS: 001188043100001.

- Chumak M. A. (синтез углеродных нанотрубок, полевые эмиссионные испытания, анализ результатов, подготовка публикации), Rokacheva A. A., Filatov L. A., Kolosko A. G., Filippov S. V., Popov E. O. Fabrication and complex investigation of LAFE based on CNT by PECVD with island catalyst. In *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Т. 2103. – №. 1. – С. 012110. DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012110, Scopus ID: 2-S2.0-85123471406.
- Chumak M. A. (полевые эмиссионные испытания, анализ результатов, подготовка публикации), Rokacheva A. A., Filatov L. A., Bizyaev I. S., Popov E. O., Filippov S. V., Kolosko A. G. Degradation of an emitter based on VACNT made by DC-PECVD during field emission. In *2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, IEEE. – 2021. – С. 1-2. DOI: 10.1109/IVNC52431.2021.9600739. Scopus ID: 2-S2.0-85123385633. WOS: 000742045500106.
- Chumak M.A. (синтез углеродных нанотрубок, полевые эмиссионные испытания, анализ результатов, подготовка публикации), Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. Investigation of field emission properties of CNT arrays of different morphologies, *Nanomaterials*. – 2024. – Т. 14. – №. 9. – С. 763. DOI: 10.3390/nano14090763. Scopus ID: 2-s2.0-85192759921, WOS: 001220025100001.
- Chumak M. A. (полевые эмиссионные испытания, проведение расчетов, анализ результатов, подготовка публикации), Chikova A. M., Filippov S. V., Kolosko A. G., Popov E. O. (2017, November). Empirical evaluation of the field enhancement factor as a function from electrode spacing for LAFE and single emitter. In *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. – 2017. – Т. 917. – №. 9. – С. 092025. DOI: 10.1088/1742-6596/917/9/092025. Scopus ID: 2-s2.0-85036458161. WOS: 000423729100219.
- Evsikov I. D., Demin G. D., Gryazneva T. A., Makhboroda M. A., Djuzhev N. A., Pankratov O. V., Popov E. O., Filippov S. V., Kolosko A. G., Chumak M. A (полевые эмиссионные испытания, обработка результатов, подготовка публикации). Experimental study of the multi-tip field emitter based on the array of silicon pyramidal microstructures. In *2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, IEEE. – 2021. – С. 1-2. DOI: 10.1109/IVNC52431.2021.9600731. Scopus ID: 2-S2.0-85123370909, WOS: 000742045500108.

- Kolosko A. G., Filippov S. V., Chumak M. A. (полевые эмиссионные испытания, обработка результатов, подготовка публикации), Popov E. O., Demin G. D., Evsikov I. D., Djuzhev N. A. Features of evaluating properties of field emitters using effective parameters. In 2019 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS), IEEE. – 2019. – С. 1-4. DOI: 10.1109/PowerMEMS49317.2019.8206320100884, WOS: 000576757900060.
- Chumak M.A. (синтез углеродных нанотрубок, полевые эмиссионные испытания, анализ результатов, подготовка публикации), Filatov L.A., Ezhov I.S., Kolosko A.G., Filippov S.V., Popov E.O., Maximov M.Y. (2022). Influence of NiO ALD Coatings on the Field Emission Characteristic of CNT Arrays. *Nanomaterials*. – 2022. – Т. 12. – №. 19. – С. 3463. DOI: 10.3390/nano12193463. Scopus ID: 2-s2.0-85139919168, WOS: 000867969000001.
- Chumak M.A. (синтез углеродных нанотрубок, полевые эмиссионные испытания, анализ результатов, подготовка публикации), Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., Kirilenko D.A., Bert N.A., Zhizhin E.V., Koroleva A.V., Yezhov I.S., Maximov M.Yu. Reducing and tuning of the work function of field emission nanocomposite CNT/NiO cathodes by modifying the chemical composition of the oxide, *Nanoscale*. – 2024. – Т. 16 (21). – С. 10398-10413. DOI: 10.1039/D4NR00908H. Scopus ID: 2-s2.0-85193527980, WOS: 001221188700001.

На автореферат поступило 7 отзывов.

1. Отзыв кандидата физико-математических наук Никифорова Константина Аркадьевича, доцента Санкт-Петербургского государственного университета, положительный, содержит 2 замечания:
 - В автореферате не показано при каком давлении остаточных газов происходили исследования полевой эмиссии?
 - Для каких приложений углеродные трубки с металл-оксидным нанесением имеют перспективы для использования?
2. Отзыв член-корреспондента РАН доктора физико-математических наук профессора Светухина Вячеслава Викторовича, директора НПК «Технологический центр», и кандидата технических наук Кицюка Евгения Павловича, начальника научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр», положительный, содержит 3 замечания:
 - В тексте автореферата не приведено обоснование выбора оксидов металлов, использованных для покрытия УНТ.
 - Интересно было бы увидеть, как изменился максимальный ток эмиссии, важный для СВЧ применений, для образцов, покрытых NiO.

- В автореферате нет информации, исследовалась ли временная стабильность эмиссионного тока катодов с покрытием NiO и TiO₂.
3. Отзыв кандидата технических наук Закирова Ильдара Илюсовича, доцента кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, положительный, содержит 3 замечания:
- До каких предельных температур нагревался катод при исследовании эмиссионных характеристик?
 - Как достигалась приоритетная ориентация углеродных нанотрубок при их изготовлении на плоских подложках?
 - На рисунках 12-14, 16 представлены последовательные регистрации вольтамперных характеристик с последовательным увеличением напряжением на катоде. С чем связано смещение этих характеристик, которые наблюдаются на всех исследуемых образцах.
4. Отзыв кандидата технических наук Зелениной Елены Владимировны, старшего научного сотрудника АО «Радиовый институт им. В.Г. Хлопина», положительный, замечаний не содержит.
5. Отзыв кандидата физико-математических наук Кузьмина Михаила Валерьевича, заведующего лабораторией физики элементарных структур на поверхности ФТИ им. А.Ф. Иоффе, положительный, содержит 3 замечания:
- Было бы полезно раскрыть причины выбора NiO и TiO₂ в качестве материалов покрытия катодов.
 - В автореферате не указано, при каком полном энергетическом разрешении и температуре образца регистрировались спектры РФЭС. Без этой информации неясно, какова погрешность при определении энергии компонент фотоэлектронных спектров на рис. 7 и 10 (в тексте значения энергий приводятся с точностью до 0.01 эВ).
 - На некоторых рисунках, например, рис. 6, обозначения невозможно прочитать.
6. Отзыв кандидата физико-математических наук Дидейкина Артура Ториевича, ведущего научного сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе, положительный, содержит 3 замечания:
- В разделе «Научна новизна» указывается, что для УНТ с нанесенными слоями TiO₂ и NiO получены стабильные токи полевой эмиссии на уровне 1.5 – 3 mA, однако не указывается площадь эмиттера величина поля, что не позволяет сопоставить результат с достигнутыми ранее и приведенными в литературе.
 - К сожалению, в автореферате не приводятся результаты исследования долговременной стабильности характеристик

образцов полевых эмиттеров на основе УНТ с покрытиями из TiO_2 и NiO , хотя эта характеристика представляется одной из важнейших для практического применения полевых эмиттеров на основе нанокристаллических структур.

- При описании результатов исследования полевых зависимостей эмиссионных токов исследованных структур автор приводит данные по так называемому режиму ступенчатой тренировки, предшествующему измерениям. Из автореферата не понятно какие процессы в образцах определяет его необходимость, и из каких соображений выбиралась длительность ступеней, задаваемых в этом режиме.
7. Отзыв академика НАН Беларуси доктора физико-математических наук Комарова Фадея Фадеевича, заведующего лабораторией элионики Научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, положительный, содержит 2 замечания:
- Почему для исследований был выбран обсуждаемый тип углеродных нанотрубок, на основе которых затем были изготовлены полевые катоды?
 - Металлическими или полупроводниковыми свойствами обладают углеродные нанотрубки в представленных исследованиях? Играет ли роль тип проводимости нанотрубки на эмиссионные свойства катодов в целом?

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Влияние оксидных покрытий на полевые эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок» были получены следующие основные результаты:

1. Получены стабильные токи полевой эмиссии для углеродных нанотрубок (УНТ), покрытых тонкими слоями NiO и TiO_2 , на уровне 1.5 - 3 мА при площади катодов 1 см².

2. Представлена возможность снижения и настройки работы выхода автоэмиссионных катодов УНТ/ NiO путем изменения химического состава оксидной пленки в результате термического отжига.

3. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии по отсечке вторичных электронов подтверждено снижение работы выхода автоэмиссионных катодов на основе углеродных нанотрубок, покрытых тонкими слоями TiO_2 , до 3.68 эВ, по сравнению с чистыми углеродными нанотрубками, у которых работа выхода составила 4.95-4.98 эВ.

4. Показано, что для нанокompозитных катодов УНТ/ NiO и УНТ/ TiO_2 отсутствует этап тренировки или активизации эмиттера, характерный для катодов на основе чистых УНТ, а именно: в этом случае не происходит заметной деградации центров эмиссии при возникновении случайных вакуумных разрядов.

5. Установлено, что прохождение теста на соответствие классическому закону полевой эмиссии Фаулера-Нордгейма (теста на «ортодоксальность») зависит от геометрических особенностей полевых катодов, при которых локальные электрические поля лежат в допустимых пределах.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для совершенствования имеющихся моделей полевой эмиссии острий, покрытых оксидами металлов. Подробное изучение структурных и электронных свойств оксидов металлов, нанесенных на УНТ, и выявление взаимосвязи между ними и полевыми эмиссионными характеристиками нанокompозитных катодов дает возможность проводить оптимизацию катодных структур такого типа. Величины работ выхода, полученные прямыми измерениями методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии по отсечке вторичных электронов для острийных катодов, покрытых оксидами металлов, могут быть полезны для оценки эффективных параметров эмиссии, таких как коэффициенты усиления поля и площади эмиссии, прямое измерение которых не осуществляется. Предложенный комплекс методов исследования структурных и зонных характеристик может быть использован для дальнейшего совершенствования холодных катодов на основе острий, покрытых оксидами металлов, для применения в устройствах вакуумной электроники.

Достоверность результатов обеспечена их воспроизводимостью на обширном экспериментальном материале, применением комплекса современных экспериментальных методик, использованием взаимодополняющих методов исследования, а также их согласованностью с результатами других исследователей. Обоснованность предложенных методов определения основных эмиссионных параметров подтверждается согласием аналитических и экспериментальных данных.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что исследования полевых эмиссионных источников электронов необходимы для создания новых изделий вакуумной наноэлектроники, обладающих высокими эмиссионными токами и длительным временем эксплуатации. Полевые эмиттеры разрабатываются для таких областей применения как полевые эмиссионные дисплеи, источники рентгеновского излучения, космические двигатели ориентации, компактные масс-спектрометры и вакуумные датчики, преобразователи энергии, СВЧ техника, терагерцовые генераторы и детекторы, широкополосная радиолокация, а также для создания новой элементной базы вакуумной наноэлектроники, устойчивой к рентгеновскому излучению и тепловому воздействию.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Снижение работы выхода автоэмиссионных катодов с использованием тонких покрытий из оксидов металлов, таких как TiO_2 , обладающих более низкой работой выхода (3.68 эВ при толщине оксидного слоя 6 нм), чем у чистых УНТ (4.95-4.98 эВ), что согласуется с уменьшением локальных электрических полей, требуемых для осуществления автоэлектронной эмиссии.

2. Изменение химического состава в результате термического отжига оксидной пленки нанокompозитных катодов УНТ/ NiO (при толщине пленки 7.5 нм), приводит к снижению работы выхода с 4.48 до 3.21 эВ, а также к снижению пороговых макроскопических полей, требуемых для возникновения автоэлектронной эмиссии.

3. Нанокompозитные полевые катоды УНТ/ NiO и УНТ/ TiO_2 работают в автоэмиссионном диапазоне полей, характерном для классического закона полевой эмиссии (тест Форбса), которые находятся в пределах допустимых значений и соответствуют стандартному автоэмиссионному режиму.

4. Для нанокompозитных полевых катодов УНТ/ NiO и УНТ/ TiO_2 отсутствует этап тренировки или активизации эмиттера, характерного для катодов на основе чистых УНТ, а именно: не происходит заметной деградации центров эмиссии в результате случайных вакуумных разрядов.

Личный вклад состоит в постановке цели и задач диссертационного исследования, в изготовлении, комплексной характеристике, изучении морфологии, электронной и геометрической структуры образцов, проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных, анализе и публикации результатов работы. Интерпретация, обсуждение и выявление физических закономерностей исследованных процессов проводились совместно с научным руководителем и с соавторами публикаций.

Основные результаты, были представлены в 5 докладах на российских и международных конференциях: 1) International conference PhysicA.SPb/2021. Chumak M.A., Rokacheva A.A., Filatov L.A., Kolosko A.G., Filippov S.V., Popov E.O. «Fabrication and complex investigation of LAFE based on CNT by PECVD with island catalyst»; 2) 33rd International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC 2020. Chumak M., Sayfullin M., Nikiforov K. «Numerical Simulation of Surface Morphology of Two-Tier Microsized Matrix Structure of SiC FEA»; 3) 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC 2021. Chumak M.A., Rokacheva A.A., Filatov L.A., Bizyaev I.S., Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G. «Degradation of an emitter based on VACNT made by DC-PECVD during field emission»; 4) 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC

2021. Evsikov I.D., Demin G.D., Gryazneva T.A., Makhboroda M.A., Djuzhev N.A., Pankratov O.V., Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., Chumak M.A. «Experimental study of the multi-tip field emitter based on the array of silicon pyramidal microstructures»; 5) 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS) 2019 Kolosko A.G., Filippov S.V., Chumak M.A., Popov E.O., Demin G.D., Evsikov I.D., Djuzhev N.A. «Features of evaluating properties of field emitters using effective parameters».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов по специальности 1.3.5 – «физическая электроника», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 19, против – 0, воздержался – 0.

На заседании 19 июня 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Чумаку М.А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – «физическая электроника».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Г.С. Курский

19 июня 2025 г.