

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03,
созданного 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 13.04.2023 № 2

О присуждении Филиппову Сергею Владимировичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Разработка методов определения основных эмиссионных параметров наноструктурированных полевых эмиттеров» по специальности 1.3.5 - физическая электроника принята к защите 02 февраля 2023 г., протокол №1, диссертационным советом ФТИ 34.01.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 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 от № 13 от 09.02.2021 г. и № 41 от 25.02.2022 г. и № 28 от 16.02.2023 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.03 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 г. о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Филиппов Сергей Владимирович, 01 ноября 1990 года рождения, в 2013 году окончил специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Нanomатериалы». В 2017 году окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический

институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук по направлению 03.06.01 - «Физика и астрономия». Кандидатский экзамен по специальности 01.04.04 – «физическая электроника» успешно сдан соискателем в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе в 2017 г. В настоящее время соискатель работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника в циклотронной лаборатории Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в циклотронной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Попов Евгений Олегович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник циклотронной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Шешин Евгений Павлович, доктор физико-математических наук, заслуженный профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», заведующий лабораторией вакуумной и СВЧ электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

2. Егоров Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой моделирования электромеханических и компьютерных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук предоставила положительное заключение на диссертацию, содержащее 4 замечания. Заключение подготовлено доктором физико-математических наук, ведущим сотрудником лаборатории информационно-измерительных био- и хемосенсорных микросистем ИАП РАН Буляницей А.Л. и подписано доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником ИАП РАН Явором М.И. Отзыв утверждён доктором технических наук, директором ИАП РАН Евстратовым А.А. В заключении указано, что содержание диссертации Филиппова С.В. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.5 – «физическая электроника», а соискатель Филиппов С.В. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба они 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 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук ведет активные исследования в области естественных наук. Проводится изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания новых приборов и методов экспериментальной физики, активно разрабатываются методы и приборы нанотехнологии и диагностики наноструктур. В состав института входят лаборатории масс-спектрометрии, оптики заряженных частиц и математического моделирования, автоматизации измерений и цифровой обработки сигналов, лаборатория систем детектирования частиц и излучений, тематика исследований которых близка к теме диссертации. Кроме того, в ИАП РАН действует диссертационный совет специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Основное содержание диссертации представлено в 14 работах, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, опубликовано 10 работ:

1. Filippov S.V., Popov E.O., Kolosko A.G. Modeling basic tip forms and its effective field emission parameters // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* – 2021. – Т. 39. – №.4. – С. 044002-1-7 (Разработка моделей эмиттеров различной формы, расчёт эффективных параметров из вольтамперных характеристик, проведение экспериментов, написание текста статьи).
2. Forbes R.G., Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V. The pre-exponential voltage-exponent as a sensitive test parameter for field emission theories // *Royal Society Open Science.* – 2021. – Т. 8. – №. 3. – С. 201986-1-19 (Моделирование и расчёт значений степени предэкспоненциального множителя напряжения для НСР эмиттера, обработка вольтамперных характеристик, расчёт эмиссионных параметров, обсуждение текста статьи).

3. Filippov S.V., Kolosko A.G., Popov E.O., Demin G.D., Makhboroda M.A., Djuzhev N.A., Gryazneva T.A., Korotkov S.Y. Investigation of the emission properties of a silicon bladetypе cathode // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1400. – №. 5. – С. 055011-1-6 (Проведение экспериментов, обработка экспериментальных вольтамперных характеристик и картин свечения, написание текста статьи).
4. Filippov S.V., Kolosko A.G., Ryazanov R.M., Kitsyuk E.P., Popov E.O. Investigation of multi-tip large area emitters using computerized field emission projector // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Т. 525. – С. 012051-1-9 (Проведение экспериментов, разработка алгоритма исследования полевых катодов, обработка экспериментальных вольтамперных характеристик и картин свечения, написание текста статьи).
5. Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., Knápek A. Comparison of the effective parameters of single-tip tungsten emitter using Fowler–Nordheim and Murphy–Good plots // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2022. – Т. 40. – №. 2. – С. 024201-1-8 (Проведение экспериментального исследования одноострийных вольфрамовых эмиттеров, разработка метода определения формы эмиттера из его ВАХ, обсуждение текста статьи).
6. Kolosko A.G., Filippov S.V., Popov E.O., Ponyaev S.A., Shchegolkov A.V. Investigation of the current level instability of the multitip field emitters with computerized field emission projector // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2020. – Т. 38. – №. 6. – С. 062806-1-7 (Проведение экспериментов обсуждение текста статьи).
7. Dall’Agnol F.F., Filippov S.V., Popov E.O., Kolosko A.G., de Assis T.A. Determining the field enhancement factors of various field electron emitters with high numerical accuracy // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2021. – Т. 39. – №. 3. – С. 032801-1-11 (Разработка моделей эмиттеров

различной формы, расчёт коэффициента усиления поля острых эмиттеров, написание и обсуждение текста статьи).

8. Filippov S.V., Popov E.O., Kolosko A.G. Numerical simulations of field emission characteristics of open CNT // *Ultramicroscopy*. – 2021. – Т. 230. – С. 113362-1-4 (Моделирование и расчёт эмиссионных параметров одностенной углеродной нанотрубки, написание текста статьи).

9. Filippov S.V., Dall’Agnol F.F., de Assis T.A., Popov E.O., Kolosko A.G. Properties of blade-like field emitters // *Ultramicroscopy*. – 2022. – Т. 233. – С. 113462-1-7 (Разработка моделей лезвийных эмиттеров, проведение моделирования и расчёт их эмиссионных параметров, разработка новой оптимальной формы лезвийного эмиттера, написание текста статьи).

10. Filippov S.V., Kolosko A.G., Popov E.O., Forbes R.G. Behavior of notional cap-area efficiency (η_n) for hemisphere-on-plane and related field emitters // 2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC). – IEEE, 2021. – С. 1-2 (Расчёты приведенной условной площади эмиссии, обсуждение текста статьи).

11. Filippov S.V., Kolosko A.G., Popov E.O., Forbes R.G. Field emission: calculations supporting a new methodology of comparing theory with experiment // *Royal Society Open Science*. – 2022. – Т. 9. – С. 220748 (Моделирование и расчёт значений степени предэкспоненциального множителя напряжения для эмиттеров различной геометрии, обсуждение текста статьи).

12. Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G. Processing of experimental current-voltage characteristics of single tip emitters taking into account the functional dependence of the emission area on the applied voltage // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2023. – Т. 41. – №. 1. – С. 012801-1-7 (Расчёты приведенной условной площади эмиссии, разработка новых КР-координат для анализа ВАХ, проведение экспериментального исследования одноострийного вольфрамового эмиттера, обсуждение текста статьи).

13. Filippov S.V., Dall’Agnol F.F., Popov E.O., Kolosko A.G., de Assis T.A. Reaching homogeneous field emission current from clusters of emitters with non-uniform heights // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2023. – Т. 41. – №. 1. – С. 010601-1-5 (Разработка компьютерной модели кластеров эмиттеров и проведение расчётов по оптимизации их токовой нагрузки, обработка результатов моделирования, написание текста статьи).

14. Filippov S.V., Kolosko A.G., Popov E.O. Outgassing during large area field emitter operation in the diode system // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2022. – Т. 40. – №. 2. – С. 024002-1-6 (Проведение экспериментальных исследований полевых эмиттеров, обработка масс-спектрометрических данных, разработка механизма, описывающего поведение эмиссионного тока при ступенчатом изменении уровня приложенного напряжения, написание текста статьи).

На автореферат поступило 8 отзывов.

1. Отзыв кандидата технических наук, Чепусова Александра Сергеевича, научного сотрудника Института электрофизики Уральского отделения РАН, положительный, содержит 2 замечания:

- В Главе 1 автор приводит набор перспективных материалов для автокатодов: углеродные нанотрубки, графен, вольфрам, кремний, оксид цинка. В последующих главах исследованы эмиттеры из углеродных наноматериалов и вольфрама. Почему выбран именно этот класс материалов? Насколько применима разработанная модель для полупроводниковых эмиттеров, например, из кремния или оксида цинка?
- Чем отличаются «быстрый» и «медленный» режимы питания? В автореферате приведены результаты только по «быстрому» режиму.

2. Отзыв кандидата физико-математических наук, Никифорова Константина Аркадьевича, доцента Санкт-Петербургского

государственного университета, положительный, содержит 2 замечания:

- В автореферате ошибка определения эмиссионных параметров с помощью КР-координат была только продекларирована, но так и не было представлено сравнение результатов анализа с результатами, полученными методами Фаулера-Нордгейма и Мёрфи-Гуда.
- В автореферате в явном виде не указана программная среда, в которой проводились расчеты эмиссионных параметров.

3. Отзыв доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ, Ткачева Алексея Григорьевича, заведующего кафедрой Техники и технологии производства нанопродуктов Тамбовского государственного технического университета, положительный, содержит 1 замечание:

- В автореферате не приведена информация о программном обеспечении, с помощью которого проводилось численное моделирование и регистрация вольт-амперных характеристик и картин свечения полевого эмиссионного проектора.

4. Отзыв кандидата физико-математических наук, Бернацкого Дмитрия Петровича, старшего научного сотрудника Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе РАН, положительный, замечаний не содержит.

5. 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 2 замечания:

- В тексте автореферата не приведено сравнение исследуемых эмиссионных параметров для всех типов эмиттеров, которые

упоминаются в тексте (МУНТ-полистирол, ОУНТ-полистирол, графен-полистирол).

- Не раскрыта причина использования полистирола в эмиттерах и его влияние на эмиссионные параметры эмиттеров.

6. Отзыв доктора физико-математических наук, Цыбина Олега Юрьевича, профессора Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, положительный, содержит 1 замечание:

- В автореферате было бы уместно привести сравнительную оценку перспектив применения нанокompозитных и многоострийных эмиттеров, которую естественно было бы ожидать от работы.

7. Отзыв доктора физико-математических наук, Нефёдцева Евгения Валерьевича, старшего научного сотрудника Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, положительный, содержит 4 замечания:

- Фраза «Разработаны новые координаты» неудачна. Как видно из формулы (8), «разработанные новые координаты» — это те же координаты Фаулера-Нордгейма с поправочными коэффициентами, которые все же несут в себе важный физический смысл.
- В автореферате не дана предварительная расшифровка сокращений «МУНТ», «ОУНТ», «ПС». Сокращенные обозначения композиций углеродных нанотрубок на полистирольной основе в одних местах записаны через тире, в других — через косую черту.
- Формулы (2) и (3), представляющие связь коэффициента усиления электрического поля γ с параметрами острия σ и θ изобилуют подгонными коэффициентами. Для hSoC - и Nur - типов эмиттеров их, в итоге, $3 \cdot 4 = 12$. В данном случае следовало бы попытаться применить не последовательную схему

аппроксимации (по σ , а затем по θ) а, используя известные методы, провести расчеты γ по определенной схеме совместного варьирования σ и θ в практически значимых диапазонах значений для получения более простой и удобной формулы (например, в классе функций $\gamma = A\sigma^B\theta^C$). Возможно, потеря точности при этом была бы незначительна.

- Из автореферата не понятно, как можно на практике реализовать массив полевых эмиттеров с заданным оптимальным распределением их по высоте, нивелирующим краевые эффекты LAFE.

8. Отзыв кандидата технических наук, Закирова Ильдара Илюсовича, доцента кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, положительный, содержит 3 замечания:

- В подписи к рисунку 1д, отсутствуют обозначения пронумерованных объектов в блок-схеме.
- На рисунке 2а для некоторых из моделей острий не видно на шкале каким значениям соответствует цветовая гамма распределения FEF.
- Выбранный материал при изготовлении катодов – полистирол деполимеризуется в вакууме при 350-420 °С, который будет сопровождаться выделением СО и других составляющих. В связи с этим возникает вопрос к автору: до каких предельных температур нагревался катод в процессе экспериментов? Почему был выбран этот материал?

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по разработке методов определения основных эмиссионных параметров наноструктурированных полевых эмиттеров были получены следующие основные результаты:

1. Проведено моделирование острийных и лезвийных эмиттеров разной геометрии, а также массива из 11 острий, имеющих форму полусферы на цилиндрическом основании. Построен «атлас» максимальных значений коэффициента усиления поля (FEF) для наиболее перспективных форм острийных эмиттеров: полусфера на цилиндрическом основании (HCP), полусфера на ортогональном конусе (hSoC), полуэллипсоидальное (Elli), параболоидальное (Par) и гиперболоидальное (Hyp) острия, а также открытая одностенная углеродная нанотрубка (OpenCNT). На основе проведённых расчётов разработана универсальная формула для определения FEF на вершине эмиттера в широком диапазоне геометрических параметров: аспектного соотношения на вершине $\sigma_{\text{арех}} \in [10; 1000]$ и полуугла при вершине $\theta \in [2^\circ; 20^\circ]$.
2. Были смоделированы вольт-амперные характеристики острийных эмиттеров с использованием нескольких уравнений типа Фаулера-Нордгейма. По модельным ВАХ построены и выведены зависимости приведённой условной площади эмиссии g_n и сдвига показателя степени предэкспоненциального множителя напряжения \mathcal{K}_A от барьерного поля на вершине f_a .
3. Разработана экспериментальная методика определения формы острия по его ВАХ, основанная на накоплении статистических данных в координатах $\ln(I_m/J_k)$ и $\ln(f_a)$. Методика верифицирована на примере одноострийных вольфрамовых эмиттеров.
4. Показана принципиальная возможность оптимизировать индивидуальную токовую нагрузку для массивов любой плотности острий. Предложен эллипсоидальный профиль распределения высот острий в массиве, который обеспечивает высокую токовую нагрузку – с минимальным разбросом индивидуальных токов. Разработана и исследована новая, оптимальная форма лезвийного эмиттера с полуэллипсоидальной кромкой вершины, имеющая оптимальное

распределение плотности эмиссионного тока и максимальное значение условной площади эмиссии при фиксированном уровне тока.

5. Исследован процесс активации нанокompозитных эмиттеров большой площади (LAFE): многостенные углеродные нанотрубки/полистирол (МУНТ/ПС), одностенные углеродные нанотрубки/полистирол (ОУНТ/ПС), многослойные графеновые нанопластины/полистирол (МГНП/ПС). Изучены переходные процессы при ступенчатом изменении приложенного напряжения. Построен эмиссионный профиль эмиттера и проведена оценка изменений работы выхода эмиссионных центров для разных уровней тока. Предложен механизм, описывающий характерное поведение эмиссионного тока при изменении уровня напряжения.
6. Разработан алгоритм активации, исследования и оценки автоэмиссионных характеристик полевых катодов, результатом выполнения которого является создание «паспорта» эмиттера. Данный паспорт необходим для сравнения свойств полевых катодов и оптимизации технологии их изготовления.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную и практическую значимость. Разработанные новые полулогарифмические координаты для определения эффективных эмиссионных параметров из ВАХ имеют важное значение для устранения расхождения между результатами теоретических расчётов и экспериментальными данными полевых эмиттеров. Разработанная универсальная формула позволяет с точностью до 1.5% определить коэффициент усиления поля на вершине для основных форм острия. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенных методов исследования для технологической оптимизации перспективных эмиттеров. Проведённые расчёты и разработанные формы эмиттеров с оптимизированным профилем

геометрии могут быть использованы для совершенствования технологий создания холодных катодов как составной части устройств вакуумной электроники. Результатом выполнения алгоритма исследования LAFE является паспорт эмиттера, который позволяет проводить эффективное сравнение эмиссионных параметров различных эмиттеров с регулярной структурой и эмиттеров со стохастическим расположением остриёв.

Высокая степень достоверности результатов обеспечивается их проверенной воспроизводимостью, применением взаимодополняющих методов исследования, а также их согласованностью с результатами других исследователей. Обоснованность предложенных методов определения основных эмиссионных параметров подтверждается согласием результатов 3D моделирования, аналитических расчетов и экспериментальных данных.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Универсальная формула по определению коэффициента усиления поля на вершине остриёв различной геометрии. Оптимальная форма эмиттера лезвийного типа. Оптимальный профиль распределения высот остриёв в массиве, обеспечивающий равномерное распределение токовой нагрузки.
2. Метод определения формы эмиттера по его экспериментальной вольтамперной характеристике. Предложена степенная зависимость условной площади эмиссии от напряжённости поля. Разработаны новые координаты для построения вольт-амперных характеристик и определения эффективных параметров эмиттеров
3. Определение состава и кинетики основных летучих продуктов при активации и длительной работе полевых эмиттеров большой площади, на основе нанокompозитов углеродные нанотрубки и графен в полистироле.

4. Алгоритм исследования и сравнения характеристик образцов полевых эмиттеров.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии, что подробно указано в текстах диссертации и автореферата. Филиппов С.В. активно участвовал в постановке задач и разработке методов исследования полевых катодов, являлся основным исполнителем большей части расчётов и проведённых экспериментальных исследований. Анализ результатов выполнен совместно с соавторами опубликованных работ при непосредственном участии соискателя.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 5 докторов по специальности 1.3.5 - «физическая электроника», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 23, против – 0, воздержавшихся – 0.

На заседании 13 апреля 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Филиппову С.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – «физическая электроника».

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Васютинский Олег Святославович

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Единач Елена Валерьевна

18 апреля 2023 г.