

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

по диссертации

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 25.03.2021 № 3

О присуждении Попову Евгению Олеговичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук

Диссертация **«Методика и результаты исследования многоострийных полевых эмиттеров большой площади»** в виде рукописи по специальности 01.04.04 – «физическая электроника» принята к защите 03 декабря 2020 г., протокол №5, 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 ФТИ им. А.Ф. Иоффе №75 прил. 3 от 12 июля 2019 г.

Соискатель Попов Евгений Олегович, 1969 г.р., в 1993 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности 01.04.04 – «физическая электроника» и поступил на работу в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в качестве стажёра-исследователя, последовательно занимая должности младшего научного сотрудника, научного сотрудника. С 2000 года и по настоящее время работает в должности старшего научного сотрудника в циклотронной лаборатории ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН.

В 1998 году Попов Е.О. защитил диссертацию кандидата физико-математических наук, а в 2003 году получил звание доцента.

Докторская диссертация выполнена в циклотронной лаборатории ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный консультант, **Кузнецов Виктор Иосифович**, доктор физ.-мат. наук, с.н.с., зам. руководителя Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, дал **положительный отзыв** на диссертацию.

Официальные оппоненты:

1. **Фурсей Георгий Николаевич**, д.ф.-м.н., профессор, Почётный профессор СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, *профессор кафедры физики СПбГУТ*, Заслуженный деятель науки РФ.

2. **Шешин Евгений Павлович**, д.ф.-м.н., *профессор кафедры вакуумной электроники ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»*, г. Долгопрудный, Москва.

3. **Егоров Николай Васильевич**, д.ф.-м.н., профессор, *заведующий кафедрой моделирования электромеханических и компьютерных систем ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»*.

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) в своём **положительном заключении**, подписанном *заведующим кафедрой микро- и наноэлектроники*, д.т.н., профессором **Лучининым Виктором Викторовичем**, *заведующим кафедрой радиотехнической электроники*, к.т.н., доцентом **Ивановым Алексеем Сергеевичем**, и утверждённым проректором СПбГЭТУ по научной работе д.т.н., профессором, **Тупиком Виктором Анатольевичем**, указала, что

содержание диссертации Е.О. Попова по актуальности темы, уровню новизны, объёму работы, значимости и достоверности результатов **соответствует** требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и специальности 01.04.04 - «физическая электроника», а диссертант Е.О. Попов **заслуживает** присуждения степени доктора физико-математических наук.

В отзыве содержится 3 замечания:

- "Диссертация содержит большое количество важных приложений, ряд которых следовало бы поместить в основной текст диссертации. При этом ни в тексте диссертации, ни в приложениях не приводятся разработанные тексты модулей обработки эмиссионных данных в используемой программной среде".

- "Несмотря на многообразие предложенных методик анализа полевых катодов большой площади в результате проведённых исследований не представлен алгоритм эффективной оптимизации эмиссионных свойств полевых структур с учетом возможности его практического использования".

- "Разработанная методика экспресс тестирования объектов с достижением научных или практических результатов представляет несомненный интерес, но, к сожалению, аппаратурная реализация комплекса достаточно сложна и имеет ряд ограничений при решении задач в рамках значительной вариабельности возможных объектов исследований".

В отзыве Ведущей организации отмечается:

"Отмеченные недостатки не снижают достоинств работы, выполненной на высоком научном уровне. Автором диссертации проделан большой объем экспериментальной работы и проведён квалифицированный анализ полученных результатов, которые важны для исследований полевых эмиссионных структур, а также для изучения свойств нанокompозитных материалов.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные решения, вносящие значительный вклад в развитие электронного материаловедения.

По актуальности темы, уровню новизны, объёму работы, значимости и достоверности результатов диссертация Попова Евгения Олеговича соответствует требованиям п.9. «положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 физическая электроника."

Выбор **официальных оппонентов** обосновывается тем, что все они имеют учёную степень доктора физико-математических наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.1 действующего Положения о присуждении учёных степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами с мировым именем и обладают высочайшим уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах и монографиях по полевой эмиссии.

Выбор **ведущей организации** обосновывается тем, что СПбГЭТУ «ЛЭТИ», и в частности факультет электроники, широко известен своими достижениями и имеет долгую историю по массовой подготовке инженеров электронной техники для предприятий электронной промышленности всей страны. В настоящее время в СПбГЭТУ действует центр микротехнологии и диагностики, который возглавляет профессор **Виктор Викторович Лучинин**.

На автореферат поступило 10 отзывов. **Все отзывы положительные.**

1. Отзыв доктора наук (Dr. rer. nat.), *научного сотрудника отдела экспериментальной физики* Университета Вупперталь, Германия, **Павла Фёдоровича Сербуна**, **положительный** и замечаний не содержит.

2. Отзыв доктора физико-математических наук по специальности 02.00.04 - физическая химия, профессора, *заместителя директора по научной работе* Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института высокомолекулярных соединений Российской академии наук, **Бронникова Сергея Васильевича**, **положительный** и замечаний не имеет.

3. Отзыв доктора наук (Dr.S.), *приглашённого лектора* (ранее лектора) в области нанонауки в сильных электрических полях Университета Суррея, Институт передовых технологий, **Ричарда Гордона Форбса**, отзыв **положительный** и замечаний не содержит.

4. Отзыв доктора философии, *доцента кафедры электронных наук и инженерии* Киотского университета **Ясухито Гото**, **положительный** и замечаний не имеет.

5. Отзыв доктора технических наук, профессора, *главного научного сотрудника* АО «НПП Салют», **Сергея Владимировича Оболенского**, **положительный** и замечаний не имеет.

6. Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, *начальника лаборатории* в ЦКП “Микросистемная техника и электронная компонентная база”, Бориса Константиновича Медведева и к.ф.-м.н., *директора* ЦКП “Микросистемная техниками, электронная компонентная база”, Николая Алексеевича Дюжева, **положительный** и содержит одно замечание:

"В качестве замечания, следует отметить, что текст автореферата обладает избыточной информационной насыщенностью. Некоторые параграфы можно было представить в автореферате более кратко (связанные с выводом основной формулы полевой эмиссии, например, а также с

исследованием эмиттеров, имеющих второстепенное значение для основных исследований)".

7. Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, *директора* Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Зеленоград, **Вячеслава Викторовича Светухина**, **положительный** и содержит два замечания:

- "Несмотря на обширный опыт работы с различными эмиссионными материалами, в работе слабо представлена *информация об ориентированных структурах*, сформированных селективным синтезом либо полученных иным технологическим способом, обладающих заданной геометрией. Основной упор делается на исследование стохастических эмиссионных массивов, безусловно наиболее сложных в изучении объектов".

- "Также все исследования выполнены в диодном режиме, хотя многие структуры формируют в триодном исполнении с целью управления током. Возникает резонный вопрос по применимости методики и математического аппарата как к ориентированным и топологическим массивам, так и к *триодным структурам*".

8. Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, *заведующего* кафедрой физики твёрдого тела, **Александра Владимировича Скрипаля**, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры физики полупроводников, *заведующего лабораторией* плёночных наноструктурированных материалов Образовательно-научного института наноструктур и биосистем, **Евгения Геннадиевича Глуховского**, заверенный учёным секретарём ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышева, кандидат химических наук, доцентом **Ириной Валентиновны Федусенко**, **положительный** и содержит одно замечание:

"В качестве замечания диссертационной работы можно отметить следующее: автор использует выражение «онлайн обработка данных». На мой взгляд лучше использовать термин «Обработка данных в режиме реального времени».

9. Отзыв доктора технических наук, *ведущего научного сотрудника* кафедры интегральной электроники и микросистем ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», **Алексея Николаевича Белова**, заверенный учёным секретарём МИЭТ, кандидатом технических наук, профессором **Николаем Михайловичем Ларионовым**, **положительный** и содержит одно замечание:

"В результате прочтения автореферата и текста диссертации возник вопрос, почему разработанный сложный программно-аппаратный комплекс с системой синхронизации потоков данных и защиты АЦП от высоковольтных разрядов, не использовался для исследования *триодных систем* на базе полевых эмиттеров?"

10. Отзыв доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Техника и технологии производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет, **Алексея Григорьевича Ткачёва** и к.т.н., доцента кафедры "ТТПН" ФГБОУ ВО ТГТУ, **Александра Викторовича Щеголькова**, **положительный** и замечаний не имеет.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований решён большой комплекс теоретических и экспериментальных задач, являющихся актуальными для современной физики полевых эмиттеров, а именно:

1. Разработан и реализован метод измерения и онлайн обработки характеристик многоострийных полевых эмиттеров большой площади в различных режимах высоковольтного питания, создан аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс для фундаментальных

экспериментальных исследований и технологической оптимизации изготовления полевых эмиттеров, который включает в себя одновременную регистрацию и онлайн анализ вольт амперных характеристик, масс-спектрометрических данных и эмиссионных изображений.

2. Исследованы полевые эмиттеры разных типов. Предложен методический подход определения температуры эмиссионных центров нанокompозитных эмиттеров, основанный на масс-спектрометрических измерениях процесса термодеструкции полимерной матрицы.

3. На основании масс-спектрометрических данных и компьютерного моделирования адсорбционно-десорбционных процессов дано объяснение эффекту гистерезиса в вольт-амперных характеристиках эмиттеров различного типа с возможностью прогнозирования переходов из одной формы гистерезиса в другую (прямой, обратный и в форме восьмёрки).

4. Впервые экспериментально применён (в режиме онлайн) тест Р. Форбса на соответствие эмиссии полевому режиму. Показано, что эмиттеры большой площади на основе одностенных и многостенных углеродных нанотрубок соответствуют основной теории Фаулера-Нордгейма.

5. Экспериментально подтверждено теоретическое предсказание о двухкомпонентном распределении коэффициентов усиления поля эмиссионных центров в наноуглеродных эмиттерах большой площади. Разработан метод оценки соотношения коэффициентов усиления поля этих компонент.

6. Разработана методика применения анализа наклон-отсечка с градуировочной сеткой (SK-анализ) к экспериментальным вольт-амперным характеристикам в режиме онлайн. Показана характерная эволюция эффективной работы выхода и коэффициента усиления поля нанокompозитных эмиттеров большой площади.

7. Захват эмиссионных изображений одновременно с регистрацией макроскопической ВАХ характеристикой позволяет строить ВАХ

характеристики индивидуальных эмиссионных центров, а также оценивать их параметры: коэффициент усиления поля и площадь эмиссии.

8. Выведен ряд теоретических приближений к основной формуле полевой эмиссии удобных для применения на практике. Детально исследован формализм и подходы экспериментального определения площади полевой эмиссии многоострийных полевых катодов.

9. Разработаны методы обработки вольт-амперных характеристик для определения степени предэкспоненциального множителя напряжения в основной формуле полевой эмиссии.

10. Предложены и использованы для обработки экспериментальных данных модифицированные координаты Фаулера-Нордгейма.

Практическая значимость результатов состоит в следующем:

Из предложенных методик анализа полевых катодов особой практической значимостью обладают: методика слежения за состоянием эмиссионной активности катода в режиме реального времени (в ходе активации и тренировки поверхности образца, в стабильном режиме, а также при переходных процессах), методика оценки эффективных параметров катода (площади эмиссии и коэффициента усиления поля) с помощью модифицированных координат Мерфи-Гуда и др. Определённый научный интерес представляют: методика тестирования вольт-амперных характеристик на предмет их соответствия классической теории полевой эмиссии, методика построения эмиссионного профиля катода по данным компьютеризированного полевого проектора, методика оценка равномерности распределения центров в пространстве и по уровню тока. Основным практическим результатом работы является созданный аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс в совокупности с разработанными методиками для изучения свойств LAFE (Large area field emitter), которые учитывают явления, сопровождающие полевую эмиссию. Полученные в работе результаты могут быть использованы специалистами,

занимающимися синтезом новых материалов на основе наноструктур, разработчиками перспективных изделий вакуумной электроники.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим фундаментальное значение. Диссертационное исследование Е.О. Попова является важной и актуальной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение крупной научной проблемы, связанной с разработкой и созданием комплексной методики исследования и тарификации многоострийных полевых эмиттеров большой площади.

Достоверность и надёжность результатов. Основные положения и выводы диссертации надёжно обоснованы теоретически и экспериментально. Все рассмотренные эффекты имеют убедительные физические объяснения. Достоверность и надёжность экспериментальных данных, полученных в ходе диссертационной работы, определяется комплексным использованием различных экспериментальных методов, многократной повторяемостью и согласованностью результатов для широкого круга полевых эмиттеров. Обоснованность предложенных физических моделей и теоретических подходов подтверждаются их внутренней согласованностью, согласием расчётных данных, 3D моделирования и экспериментальных результатов.

Личный вклад автора состоит в выборе направления исследований, постановке задач, разработке методики, создания экспериментальных установок, проведение экспериментов и анализе экспериментальных данных, построении аналитических теорий и проведении расчётов, подготовке основных публикаций и представлении результатов на научных мероприятиях. Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались на 56 конференциях.

Основное содержание диссертации представлено в 58 публикациях в журналах индексируемых в Web of Science, из которых наиболее важными являются следующие статьи (в скобках указан личный вклад автора):

- [1] Коровин О.П., Попов Е.О., Шредник В.Н., Каратецкий С.С. Многоострыйный жидкометаллический автоэлектронный эмиттер //ПЖТФ. – 1999. – Т. 25. – №. 8. – С. 39-44. (Предложен и экспериментально применён метод быстрого сканирования высоким напряжением с одновременной компьютерной регистрацией ВАХ).
- [2] Popov E.O., Pashkevich A.A., Pozdnyakov A.O., Pozdnyakov O.F. Multi-walled nanotube polymer composite degradation under high emission current regime as revealed by mass spectrometry // JVSTB. – 2008. – Т. 26. – №. 2. – С. 745-750. (Разработана многоканальная система сбора данных).
- [3] Popov E.O., Pozdnyakov A.O., Pozdnyakov O.F., Latypov Z.Z. Temperature evaluation of field emitting points for polymer-carbon nanotube composite using time-of-flight mass spectrometry // JVSTB. – 2010. – Т.28. – №.2. – C2A28-C2A32. (Проведена оценка температуры эмиссионных центров нанокompозитных эмиттеров, основанная на масс-спектрометрических измерениях процесса термодеструкции полимерной матрицы).
- [4] Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Popov E.O., Forbes R.G. Real-time implementation of the “orthodoxy test” for conformity of current–voltage characteristics with classical field electron emission theory // JVSTB. – 2016. – Т. 34. – №. 4. – С. 041802-1-7. (Разработана и впервые экспериментально внедрена методика исследования эмиттеров с использованием критерия на соответствие режиму полевой эмиссии).
- [5] Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Terukov E.I., Shchegolkov A.V., Tkachev A.G. Current-voltage characteristics of carbon nanostructured field emitters in different power supply modes //Applied Surface Science. – 2017. – Т. 424. – С. 239-244. (Экспериментально обнаружены различные формы гистерезиса эмиссионных характеристик, а также переход из одного типа гистерезиса в другой).
- [6] Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V. Electrical field admissible values for the classical field emitter regime in the study of large area emitters //AIP Advances. – 2019. – Т. 9. – №. 1. – С. 015129-1–10. (Разработаны и

обоснованы критерии теории Мерфи-Гуда в применении к исследованию LAFE).

[7] Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., De Assis T.A. Experimental confirmation of the nearly power-law relation between macroscopic current and characteristic current density in carbon nanotube-based large-area field emitters //Journal of Applied Physics. – 2019. – Т. 126. – №. 4. – С. 044304-1-7.

(Разработан и экспериментально подтверждён метод оценки соотношения коэффициентов усиления поля для набора эмиттеров, составляющих LAFE).

[8] Попов Е.О., Колосько А.Г., Филиппов С.В. Проверка применимости закона полевой эмиссии к исследованию многоострийных полевых эмиттеров методом анализа степени предэкспоненциального множителя напряжения //ПЖТФ. – 2019. – Т. 45. – №. 18. – С. 13-16. (Впервые экспериментально применён метод оценки степени напряжения, основанный на вариации степени напряжения в координатах $\ln(I/U_k)$ vs $1/U$).

[9] Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Terukov E.I., Ryazanov R.M., Kitsyuk E.P. Comparison of macroscopic and microscopic emission characteristics of large area field emitters based on carbon nanotubes and graphene // JVSTB. – 2020. – Т. 38. – №. 4. – С. 043203-1-10. (Разработана методика обработки эмиссионных изображений LAFE в режиме реального времени и впервые получены ВАХ индивидуальных эмиссионных центров).

[10] Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., de Assis T.A. Influence of the distribution of local field enhancement factors on the shape of the current-voltage characteristics of carbon-nanotube-based large-area emitters //Vacuum. – 2020. – Т. 173. – С. 109159-1-7. (Экспериментально подтверждена модель двухкомпонентного распределения коэффициентов усиления поля).

[11] Попов Е.О., Колосько А.Г., Филиппов С.В. Тест на соответствие режиму холодной полевой эмиссии с применением приближений Елинсона-Шредника и Форбса-Дина (координаты Мерфи-Гуда) //ПЖТФ. – 2020. – Т. 46(17).– С. 6-9. (Впервые в режиме реального времени применены координаты Мерфи-Гуда для обработки экспериментальных ВАХ и анализа

соответствия эмиссионному режиму работы многоострийных полевых эмиттеров).

На заседании 25 марта 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Попову Е.О. учёную степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. «Физическая электроника».

При проведении открытого голосования диссертационного совета в количестве 20 человек из 25 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали за – 20, против – 0, воздержались – 0.

Председатель
диссертационного совета
докт. физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук

А.В. Белашов

Дата: 25 марта 2021 г.