

ОТЗЫВ  
официального оппонента на диссертацию  
**Филиппова Сергея Владимировича**  
«Разработка методов определения основных эмиссионных параметров  
наноструктурированных полевых эмиттеров»  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.5 – физическая электроника

Большие ожидания, возложенные более чем два десятилетия назад на углеродные и неуглеродные многоострийные полевые эмиттеры, пока не привели к уверенным практическим результатам, а именно, повсеместному отказу от использования термоэмиссионных катодов в вакуумной наноэлектронике, космической технике, СВЧ устройствах и др. К настоящему времени наиболее значимые результаты были получены в области создания точечных источников электронов на основе полевых эмиттеров для осветительных катодоллюминесцентных ламп и миниатюрных рентгеновских источников. Основной фактор успеха в случае источников рентгеновского излучения заключается в том, что токоотбор происходит в режимах высоковольтных импульсов микро- и наносекундной длительности. В таких режимах эмиссионные структуры могут выдержать значения локальных плотностей эмиссионного тока вплоть до теоретически возможных без перехода к взрывной эмиссии. Совсем другая ситуация возникает при работе с постоянными токами или в режиме низкочастотных импульсов высокого напряжения. Основная проблема заключается в получении высоких стабильных полных токов полевой эмиссии, а также в обеспечении масштабируемости источников свободных электронов – чем больше площадь холодного катода, тем выше ток, при условии сохранения макроскопических плотностей тока на неизменном уровне. Можно называть множество причин несоответствия ожидаемых и реальных токовых характеристик от эмиссионных структур, изготавливаемым тем или иным технологическим процессом. Но пока не будут найдены способы установить достоверную связь между регистрируемой вольтамперной характеристикой (ВАХ) и основными параметрами эмиссионных структур, вопросы технологической оптимизации эмиссионных материалов не будут решены. К основным эмиссионным параметрам, как известно, относится работа выхода, коэффициент усиления поля и площадь эмиссии. Поэтому разработка фундаментальных подходов, позволяющих извлекать основные эмиссионные параметры из вольтамперных характеристик как для эмиттеров большой площади (LAFE), так и для одиночных острий имеет несомненную **актуальность.**

Диссертация С.В. Филиппова представляет собой комплексный подход к разработке теоретических, расчётных и экспериментальных методов определения основных



параметров наноструктурированных полевых эмиттеров и согласование их результатов. Решение поставленных в диссертационной работе задач необходимо для повышения точности оценки и прогнозируемости свойств полевых катодов современной вакуумной электроники.

**Научная новизна** рецензируемой работы заключается в получении ряда новых методов обработки ВАХ, как на основании теоретических исследований, так и моделирования распределения полей для наиболее востребованных эмиссионных структур, а также в предложенных автором экспериментальных методов исследования полевых эмиттеров большой площади. Перечислим некоторые, наиболее яркие, полученные в диссертационной работе, результаты:

- рассчитаны значения коэффициента усиления поля (FEF) для различных форм вершин острий, фактически описывающих основные типы эмиттеров: полусфера на цилиндрическом основании – углеродные нанотрубки, полусфера на ортогональном конусе – кремниевые острия, эллипсоидальное острие – вольфрамовые или молибденовые острия и др. в широком диапазоне значений аспектного соотношения;

- разработана оптимальная форма лезвийного катода, которая обеспечивает максимальную площадь эмиссии при фиксированном значении полного тока. Предложен новый эллипсоидальный профиль высоты массива острий, который обеспечивает оптимальное равномерное распределение токовой нагрузки по остриям;

- впервые разработан метод определения вклада формы эмиттера в степень предэкспоненциального множителя напряжения в уравнении Фаулера-Нордгейма. Метод позволяет определить форму острия по его ВАХ;

- предложен степенной вид функциональной зависимости условной площади эмиссии от напряжённости поля. Разработаны новые координаты для определения эмиссионных параметров полевых катодов;

- получены новые данные о составе летучих продуктов, выделяющихся при тренировке и работе нанокompозитных эмиттеров МУНТ-полистирол, ОУНТ-полистирол, графен-полистирол;

- разработан пошаговый алгоритм исследования и сравнения многоострийных эмиттеров.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке универсальной формулы по определению коэффициента усиления поля на вершине острий различной геометрии. Проведённые расчёты и предложенные новые формы эмиттеров, с оптимизированным профилем геометрии, могут быть использованы для совершенствования технологий создания холодных катодов как составной части устройств



вакуумной электроники.

Основным практическим результатом работы является предложенный алгоритм исследования – пошаговая инструкция по тренировке, оценке и сравнению эмиссионных свойств многоострижных эмиттеров большой площади. Проведено составление паспортов партий технологических LAFE на основании договорных и инициативных научно-технических работ.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на ведущих международных конференциях по полевой эмиссии. К таким конференциям относится международная конференция по вакуумной наноэлектронике IVNC, причем на последней IVNC (2022 г., Сеул, Южная Корея) стендовый доклад С.В. Филиппова был признан лучшим.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных сокращений и списка литературы, включающего 197 наименований, а также содержит 4 приложения. Объем диссертации составляет 134 страниц, в текст работы включены 69 рисунков и 16 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи из 5 пунктов, показана научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, достоверность и практическая значимость результатов работы, сведения об апробации работы, личный вклад автора, основные публикации автора и структура диссертации.

**Глава 1** диссертации посвящена вопросам становления и основным открытиям полевой эмиссионной науки. Анализируются особенности аппроксимаций барьерных функций Шоттки-Нордгейма. Рассмотрен вопрос проверки экспериментальных данных тестом на соответствие режиму чистой полевой эмиссии с расчётом параметра безразмерного поля.

Приведены современные представления о ключевых автоэмиссионных параметрах: размерного и безразмерного коэффициента усиления поля, условной и формальной площади эмиссии, и об их эффективных аналогах. Описаны два основных подхода к расчёту эффективных автоэмиссионных параметров путём построения в полулогарифмических координатах Фаулера–Нордгейма (ФН-график) и Мёрфи–Гуда (МГ-график). В главе также анализируются существующие экспериментальные методики, основные фундаментальные и прикладные проблемы исследования полевых катодов.

В **Главе 2** изложены методы изготовления исследованных в работе эмиттеров: вольфрамовых остриев и нанокompозитных LAFE на основе углеродных материалов, в частности, МУНТ/полистирол, ОУНТ/полистирол, многослойные графеновые пластины - МГНП/полистирол. Приведено подробное описание экспериментальной установки по



исследованию автоэмиссионных характеристик полевых катодов. Описаны программное обеспечение и использованные в работе методики для экспериментального исследования LAFE.

В **третьей главе** представлены результаты численного моделирования различных видов эмиттеров (острия, лезвия, массивы острий). Методом конечных элементов были получены распределения локального электрического поля по поверхности одноострийных и лезвийных эмиттеров различной геометрии. Рассчитаны их ключевые эмиссионные характеристики. На основе результатов моделирования была разработана универсальная формула по определению FEF на вершине эмиттера.

Экспериментально определена зависимость формальной площади эмиссии от приложенного напряжения для вольфрамового острия. Было показано, что для эмиттера, имеющего форму НСР, существует определённый «сдвиг» показателя степени предэкспоненциального множителя напряжения по сравнению с уравнением полевой эмиссии для плоского случая. Было выдвинуто предположение о степенном виде функциональной зависимости условной площади эмиссии от приложенного напряжения. Была проведена экспериментальная проверка метода определения приведённой условной площади на вольфрамовых остриях с эллипсоидальной вершиной и известным радиусом закругления.

На основе НСР модели лезвийного эмиттера была разработана новая форма с выпуклой вершиной в виде полуэллипса. Был обнаружен оптимум условной площади эмиссии. Рассчитан оптимальный профиль высот для массива из 11 острий, обеспечивающий равномерное распределение токовой нагрузки по остриям.

**Глава 4** посвящена экспериментальным исследованиям процессов тренировки нанокompозитных LAFE эмиттеров (МУНТ/ПС, ОУНТ/ПС, МГНП/ПС) и переходных процессов при ступенчатом изменении приложенного напряжения в различных режимах питания. Регистрация ВАХ и картин свечения сопровождалась регистрацией изменения состава остаточной атмосферы с помощью подключённого к экспериментальной камере времяпролётного масс-спектрометра.

На примере тренированного, стабильного на уровнях тока  $\sim 1$  мА эмиттера ОУНТ/ПС были изучены переходные процессы, которые происходят при ступенчатом изменении приложенного напряжения. С помощью масс-спектрометрического анализа была зафиксирована корреляция кинетики газовыделения молекул  $H_2$ ,  $CO$  и  $CO_2$  и эмиссионного тока. Было определено, что кинетика паров воды демонстрирует инерционный характер отклика на изменения эмиссионного тока. Причиной такого поведения являются конкурирующие адсорбционно-десорбционные процессы, происходящие как на



поверхности катода, так и анода. На основе наблюдений был представлен механизм, описывающий характерное поведение эмиссионного тока LAFE.

Переходные процессы при ступенчатом изменении напряжения дополнительно были изучены с помощью сопряжённой методики сканирования эмиттера высоким напряжением и комплексного анализа картин свечения. Зарегистрирована линейная зависимость суммарной яркости эмиссионных центров от уровня тока. Для каждой ступени напряжения были рассчитаны гистограммы распределения FEF индивидуальных эмиссионных центров.

На основе использованных методов исследования разработан алгоритм тренировки, исследования и оценки автоэмиссионных характеристик LAFE. Алгоритм состоит в измерении эмиссионных характеристик на разных уровнях тока. На каждом уровне тока регистрируется ВАХ, ВАХ – ФН, картина свечения полевого проектора, далее происходит построение гистограммы распределения эффективных коэффициента усиления поля и площади эмиссии.

В заключении диссертации суммированы основные полученные в работе результаты.

По диссертационной работе Филиппова С.В. имеются следующие замечания:

1) Что означает «обратное напряжение» в Таблице 2 «Соответствие характерных изменений состояния эмиттера...» на стр.17?

2) Было показано, что значение сдвига степени предэкспоненциального множителя  $k_A$  сильно зависит от конкретной формы острия. Насколько предложенные новые полулогарифмические КР координаты являются универсальными? Различаются ли значения сдвига степени  $k_A$  для эмиттеров с различными геометрическими параметрами, и если да, то в каких пределах?

3) В тексте на стр. 73 приведена точность аппроксимации FEF 1.15% при значениях параметра  $\sigma_{арех}$  в диапазоне [10; 1000], в то время как, в заключении диссертации указана точность аппроксимации 1.5%. Какое значение является верным?

4) В работе используется параметр безразмерного поля, определённый как отношение локальной напряженности поля к напряженности поля, необходимой для снятия барьера. Однако, что означает «масштабированное барьерное поле» и чем оно отличается от безразмерного поля?

Отмеченные замечания и недостатки носят дискуссионный характер и не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

Работа Филиппова С.В. представляет существенный вклад в изучение фундаментальных закономерностей функционирования LAFE, что определяет её несомненную научную и практическую значимость. Работа выполнена на высоком научном



уровне и полностью соответствует паспорту специальности 1.3.5 – физическая электроника. Достоверность научных результатов не вызывает сомнений и определяется наличием согласия между экспериментальными данными и результатами теоретического анализа. Диссертация написана простым и ясным языком, а автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Считаю, что диссертационная работа С.В. Филиппова «Разработка методов определения основных эмиссионных параметров наноструктурированных полевых эмиттеров» по своей актуальности, научной новизне, достоверности и практической значимости результатов полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (от 20.12.2021) предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Филиппов Сергей Владимирович, заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 - физическая электроника.

Официальный оппонент:

Шешин Евгений Павлович

01.04.07- физика конденсированного состояния

доктор физико-математических наук,

Заслуженный профессор Московского физико-технического института,

зам. заведующего кафедрой Вакуумной электроники,

зав. лабораторией вакуумной и СВЧ электроники МФТИ

141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Телефон: 8-495-408-59-44

E-mail: [sheshin.ep@mipt.ru](mailto:sheshin.ep@mipt.ru)

« 3 » марта 2023 г.

Подпись Шешина Е.П. заверяю:

Ученый секретарь

Ученого совета МФТИ

— Евсеев Е.Г..