

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

С открытием углеродных наночастиц и развитием методов нанолитографии в области полевой эмиссионной электроники наметился существенный прогресс, связанный с созданием многоострийных nanostructured полевых эмиттеров большой площади. Определение основных эмиссионных параметров – неотъемлемая часть классического анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ) полевых катодов. Их правильное и точное определение позволяет охарактеризовать эмиттер и предсказать его поведение в изменчивых условиях эксперимента, а также провести адекватное сравнение разнородных полевых катодов, что может быть использовано при технологической оптимизации перспективных автоэмиссионных структур. Таким образом, развитие методов изучения и характеризации полевых эмиттеров на сегодняшний день является достаточно **актуальным**.

Диссертационная работа Филиппова Сергея Владимировича посвящена разработке теоретических и экспериментальных методов определения основных эмиссионных параметров одноострийных и многоострийных полевых эмиттеров. Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных сокращений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, включая 69 рисунков и 16 таблиц, список цитируемой литературы из 197 наименований, список из 14 публикаций автора по материалам диссертации.

Работа охватывает самые важные вопросы исследования свойств полевых эмиттеров. Она включает в себя: разработку теоретического аппарата с удобными для использования на практике формулами, применение 3D-моделирования для учёта влияния формы катодов на их свойства, применение современных компьютеризированных систем регистрации эмиссионных характеристик, включая методы обработки разнородных сигналов в режиме реального времени. В тексте последовательно рассматриваются три ключевых параметра полевых эмиттеров: коэффициент усиления поля, площадь эмиссии и работа выхода.

Отметим основные научные результаты, полученные автором, и их **новизну**.

1) Методом конечных элементов было проведено моделирование острыйных, лезвийных эмиттеров геометрии, и массивов из острый в широком диапазоне аспектного соотношения на вершине. Построен «атлас» максимальных значений коэффициентов усиления поля (FEF) для наиболее перспективных форм острыйных эмиттеров, а также для открытой УНТ.

2) Определены функциональные зависимости приведённой условной площади эмиссии и сдвига показателя степени предэкспоненциального множителя напряжения от величины барьера поля на вершине эмиттера.

3) Разработана экспериментальная методика определения формы остряя по его ВАХ, основанная на накоплении статистических данных. Методика верифицирована при исследовании одноостройных вольфрамовых эмиттеров.

4) Предложен эллипсоидальный профиль распределения высот острей в массиве, который обеспечивает высокую токовую нагрузку – с минимальным разбросом индивидуальных токов. Разработана и исследована новая, оптимальная форма лезвийного эмиттера с полуэллипсоидальной кромкой вершины.

5) Исследован процесс активации нанокомпозитных эмиттеров большой площади (LAFE): МУНТ/ПС, ОУНТ/ПС, МГНП/ПС. Изучены переходные процессы при ступенчатом изменении приложенного напряжения. Предложен механизм, описывающий характерное поведение эмиссионного тока при изменении уровня напряжения.

6) Предложен и реализован алгоритм исследования LAFE, включающий изучение процессы активации, количественную оценку автоэмиссионных характеристик полевых катодов, результатом выполнения которого является создание «паспорта» эмиттера.

Практическая значимость заключается в разработке универсальной формулы для определения FEF на вершине эмиттера в широком диапазоне геометрических параметров и форм остряя, позволяющая определять данный параметр с высокой точностью.

Разработанный в диссертации алгоритм исследования и Паспорт эмиссионных образцов также имеет большое практическое значения для сравнения свойств полевых катодов и оптимизации технологии их изготовления.

Во **введении** представлена актуальность работы, формулируются её основная цель и задачи, научная новизна, выносимые на защиту положения, достоверность проведённых исследований и практическая значимость результатов работы, данные об апробации работы, личный вклад автора, приводятся основные публикации автора, сведения о структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** описывается базовая теория полевой эмиссии. Представлены современные положения теории полевой эмиссии, особенно режим т.н. «чистой» полевой

эмиссии, которому и посвящены все недавние разработки модифицированных уравнений Фаулера-Нордгейма. Описаны особенности перехода от плоского случая к эмиттеру, имеющему форму. Описан классический способ обработки ВАХ в полулогарифмических координатах, а также применение модифицированных координат Мерфи-Гуда. Представлены исследования величины степени напряжения в предэкспоненциальном множителе основного уравнения плотности тока для эмиттеров различных форм. Далее описаны перспективные материалы полевых эмиттеров, рассмотрены причины нестабильности эмиссионного тока.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных объектов исследования и методики регистрации эмиссионных данных. Основные объекты – одноострийные эмиттеры из вольфрама, многоострийные эмиттеры на основе углеродных нанотрубок и нанокомпозитов из нанотрубок и графена в полимерной матрице. Методика отличается скоростным сканированием образца высоким напряжением и статистической обработкой потока экспериментальных данных в режиме реального времени. Также используется масс-спектрометр и регистрация картин распределения эмиссионных центров по поверхности катода в классической системе с люминофорным покрытием.

В третьей главе представлены результаты моделирования полевых эмиттеров с наконечниками различной формы. Рассчитаны эмиссионные параметры, аналогичные эффективным параметрам, которые находятся из экспериментальных характеристик. Проведён анализ зависимости коэффициента усиления поля на вершине эмиттера от формы острия и представлена аппроксимационная формула для широкого диапазона геометрических параметров эмиттера. Проводится сравнение эффективных коэффициента усиления поля и площади эмиссии для модельных и реальных эмиттеров из углеродных нанотрубок. Выполнен анализ зависимости приведённой условной площади эмиссии от уровня приложенного напряжения. Представлен экспериментальный способ оценки степени напряжения в предэкспоненциальном факторе уравнения полевой эмиссии. Разработаны новые координаты для оценки эффективных параметров, учитывающие изменение показателя степени в предэкспоненциальном множителе напряжения, связанное с формой эмиттера. Определена оптимальная форма лезвийного эмиттера, а также оптимальный профиль распределения высот острий в массиве, минимизирующий влияние эффекта взаимной экранировки.

В четвертой главе показаны результаты масс-спектрометрических исследований при активации и работе нанокомпозитных полевых эмиттеров. Была рассмотрена активация эмиттера высоким напряжением в различных режимах питания. Рассмотрено влияние на состав остаточной атмосферы уровня приложенного напряжения и переходные

характеристики при изменении уровня напряжения. Анализ кинетики парциальных давлений позволил обнаружить кислородосодержащие молекулы, наличие которых на поверхности катода приводит к увеличению работы выхода. Методом обработки картин свечения полевого проектора проведён анализ поведения индивидуальных эмиссионных центров при изменении уровня напряжения. Анализ позволил определить группы эмиттеров с одинаковым характерным смещением работы выхода. В конце главы предложен алгоритм экспериментального исследования и сравнения эмиттеров большой площади.

Вопросы и замечания к диссертационной работе:

1. Природа процесса адсорбции/десорбции является вероятностной. Поэтому возможна ситуация, когда часть эмиссионных центров на картине свечения полевого эмиссионного проектора будет либо гаснуть, либо, наоборот, начинать светиться, т.е. выключаться или включаться в процесс эмиссии. В связи с этим возникает вопрос – какая именно яркость учитывается при расчете индивидуальных коэффициентов усиления поля – текущая или максимальная?
2. В главе 3 автор отмечает, что использование различных уравнений из семейства Фаулера-Нордгейма будет влиять на оценку эффективных эмиссионных параметров. Однако из текста диссертации не ясно, какую конкретно формулу для задания плотности тока использует автор при определении функциональной зависимости площади эмиссии и почему?
3. Что именно обозначает знак вопроса «?» в таблице 13 (вторая строка, первый столбец)? В тексте это обозначение никак не прокомментировано.
4. В подписи к рисунку 33 не приведено описание параметра s , а непосредственно на самом рисунке не указано начало отсчёта линии, вдоль которой оценивается коэффициент усиления поля.

Приведённые выше замечания не снижают общей ценности диссертации и не влияют на её практические результаты, включая защищаемые положения.

Заключение

Изложенные в диссертации результаты достаточно хорошо представлены, структурированы и не вызывают сомнений. Предложенные методики определения основных эмиссионных параметров проверены как экспериментально, так и на основе характеристик, полученных в результате 3D-моделирования. Для исследования влияния адсорбционно-десорбционных процессов на поверхности катода использованы три различные, но синхронизованные друг с другом по времени измерения методики.

Достоверность и обоснованность результатов определяется согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений и корреляцией результатов, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты исследований опубликованы в авторитетных российских и международных рецензируемых изданиях и представлены на ведущих российских и международных научных конференциях. Название и содержание диссертации соответствует паспорту специальности, а автореферат правильно передает её содержание. Полученные данные обладают достаточно высокой научной ценностью и новизной.

Диссертационная работа С.В. Филиппова является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся важные результаты по развитию и применению методов определения основных эмиссионных параметров полевых эмиттеров. Считаю, что диссертационная работа С.В. Филиппова соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-Техническом институт им. А.Ф. Иоффе», утверждённого директором ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (от 20.12.2021), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Филиппов Сергей Владимирович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Официальный оппонент

Егоров Николай Васильевич

Специальность, по которой выполнена

докторская диссертация – 05.13.18 Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ

доктор физико-математических наук, профессор,

заведующий кафедрой моделирования

электромеханических и компьютерных систем СПбГУ,

Телефон: 8 (812) 428-42-35

E-mail: n.v.egorov@spbu.ru

«15 марта 2023 г.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034.

Я, Егоров Николай Васильевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета ФТИ 34.01.03 и их дальнейшую обработку.

Личную подпись
заверяю
И.О. начальника отдела кадров №
И.И. Константинова

Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>