

«Утверждаю»
Проректор ФГАОУ ВО
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
по научной работе
д.т.н., профессор

" 4 " 03 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Попова Евгения Олеговича «Методика и результаты исследования многострийных полевых эмиттеров большой площади» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 — физическая электроника

Актуальность избранной темы. Целью диссертационной работы является исследование физических процессов в полевых эмиссионных источниках электронов и, в частности, определение применимости базовой теории полевой эмиссии к описанию функционирования многострийных полевых эмиттеров большой площади (large area field emitter – LAFE). Фактически основной задачей данной работы является разработка новой экспериментальной методики, способной в реальном времени в ходе эксперимента обрабатывать большие объемы данных об эмиссионных характеристиках и процессах, сопутствующих полевой эмиссии. Это обеспечивает экспериментатору недоступные ранее возможности для анализа и оперативного управления экспериментальными исследованиями.

Научная новизна и практическая значимость. Предложены и использованы в работе виды основного уравнения полевой эмиссии, не содержащие табулированных значений специальных функций полевой эмиссии. Формулы имеют несколько степеней точности, а использование логарифмической аппроксимации позволяет применять их для практического анализа вольт-амперных характеристик в модифицированных координатах Мерфи-Гуда.

В работе впервые предложена и реализована аппаратно-программная методика многоканального сбора данных об эмиссионных характеристиках LAFE одновременно с оперативной обработкой токовых и визуальных эмиссионных характеристик. Методика позволяет получать численную информацию о процессе полевой эмиссии, включая статистические данные о разбросе электрических характеристик катода, масс-

спектрометрические данные о распределении центров эмиссии по поверхности катода, а также при проведении исследований в процессе регистрации микроскопических параметров катода использовать различные теоретические модели и сравнивать их между собой в режиме реального времени.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Представлен комплекс фундаментальных исследований с построением семейства физико-математических моделей, описывающих многопараметрическое функционирование эмиттеров большой площади при различных режимах эксплуатации, прошедших апробацию в рамках созданного аппаратно-программного комплекса, обеспечившего научно-технологические рекомендации по оптимизации создаваемых полевых эмиттеров на основе различных материалов и конструкторских решений.

Достоверность выводов и научных положений. Достоверность результатов исследований определяется комплексным использованием различных экспериментальных методов, многократной воспроизводимостью результатов для широкого круга полевых эмиттеров. Обоснованность предложенных физических моделей и теоретических подходов подтверждается согласием расчётных данных, 3D моделирования и экспериментальных результатов. Объектами исследований являлись несколько десятков различных типов эмиттеров, относящихся к разным классам и технологиям изготовления (ориентированные и неориентированные, регулярные и стохастические, твердотельные и жидкокометаллические, углеродные, металлические и полупроводниковые, многоострийные и одноострийные).

Значимость для науки и практики полученных автором результатов. 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, методика оценки среднего значения и стохастического разброса эффективных параметров в стабильном режиме работы катода, методика построения градуировочной сетки на SK-диаграмме для оценки состояния катода в режиме реального времени (оцениваются такие параметры, как работа выхода и эффективный коэффициент усиления поля). Определенный 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.

Полученные в работе результаты могут быть использованы специалистами, занимающимися синтезом новых материалов на основе наноструктур, разработчиками перспективных изделий вакуумной электроники, работающими в НПК "Технологический центр" и ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база», г. Зеленоград, Институте высокомолекулярных соединений РАН, АО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, исследователями в области полевой и термополевой эмиссии в научных лабораториях МФТИ, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, СПбГУ, СПбПУ им. Петра Великого, СПбГТИ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Содержание диссертации и ее завершенность.

Диссертация содержит 310 страниц, основной текст изложен на 253 страницах, содержит 137 рисунков, 12 таблиц, описание выводов, список литературы и 14 приложений. Список цитируемой литературы содержит 370 наименований, а также дополнительно отдельно выделенный список из 71 публикации автора, преимущественно входящих в международную базу Web of Science (58 публикаций), из рекомендованного списка для докторской диссертации и 30 опубликованных тезисов конференций. Автореферат диссертационной работы полностью отражает ее содержание.

Достиоинства и недостатки работы. Диссертация оформлена качественно, с большим количеством иллюстративного материала, написана грамотным языком с общепринятыми физическими терминами.

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 проведенных 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.

Отмеченные недостатки не снижают достоинств работы, выполненной на высоком

научном уровне. Автором диссертации проделан большой объем экспериментальной работы и проведен квалифицированный анализ полученных результатов, которые важны для исследований полевых эмиссионных структур, а также для изучения свойств нанокомпозитных 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, объему работы, значимости и достоверности результатов, диссертация Попова Евгения Олегович соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Выступление Попова Е.О. заслушано на совместном научном семинаре кафедр микро- и наноэлектроники и радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Результаты работы получили положительную оценку.

Отзыв ведущей организации, подготовленный заведующими кафедрами МНЭ и РТЭ д.т.н. профессором Лучининым В.В. и к.т.н., доцентом Ивановым А.С., рассмотрен и утвержден на заседании Семинара (протокол № 1 от 25.02.2021 г.).

Председатель Семинара
заведующий кафедрой
микро- и наноэлектроники,
д.т.н. профессор



В.В. Лучинин

Секретарь Семинара
заведующий кафедрой
радиотехнической электроники
к.т.н., доцент

А.С. Иванов

ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, СПб, ул. Проф. Попова, д. 5.

Тел.: 8 (812) 234-1682 e-mail: cmid_leti@mail.ru