

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию
Попова Евгения Олеговича
«Методика и результаты исследования
многоострийных полевых эмиттеров большой площади»
представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.04 — физическая электроника

Актуальность темы

Фундаментальным вопросом исследований является вопрос применимость теории полевой эмиссии, разработанной более 90 лет назад, к современным многоострийным эмиттерам большой площади (large area field emitter - LAFE).

Дело в том, что огромное многообразие эмиссионных структур, не позволяют убедительно подтвердить или опровергнуть применимость (или границы применимости) основной формулы полевой эмиссии Фаулера-Нордгейма для исследования LAFE. Кроме того, так называемые «точечные эмиттеры», изготовленные в виде пучков нано- и микроволокон, также сильно отличаются от одноострийных эмиттеров по своей природе, и могут рассматриваться как многоострийные.

В последние годы наблюдается серьёзная ревизия базовых подходов к выводу и введению приближений для построения структуры основной формулы полевой эмиссии. Несмотря на развитие теоретических исследований для полевых эмиттеров с малыми радиусами закругления вершины, надёжных экспериментальных данных о соответствии модифицированных формул полевой эмиссии, например, для одностенных углеродных нанотрубок, пока не получено. Важным направлением теоретической мысли, является учёт влияния атомарной структуры (density functional theory - DFT) на структуру основной формулы полевой эмиссии. Последние работы в этой области показывают, что влияние являются несущественными и не дают основание отказываться от модели Зоммерфельда. В последние 1-2 года идут интенсивные исследования с помощью компьютерного моделирования эмиттеров различной формы для определения ВАХ и их эффективных параметров для сравнения с реальными эмиттерами.

В тоже время в некоторых работах отмечается, что около 40% публикаций по полевой эмиссии содержат данные, не соответствующие принципам и моделям, лежащих в основе квантовомеханической теории полевой эмиссии, причём основной причиной такого несоответствия называются несовершенство методов измерений и обработки ВАХ в применении к массивам из эмиссионных центров.

Поэтому, второй фундаментальной задачей, неразрывно связанной с первой

теоретической, является методология экспериментального определение характеристик современных LAFE эмиттеров.

Однако задача эта оказалась необычайно сложной, так как многоострийные эмиттеры демонстрируют до десятка различных параметров, которые надо регистрировать, синхронизовать и проводить экспресс анализ в ходе эксперимента. Примером осознания важности комплексного подхода к исследованию и real-time обработки данных полевых эмиссионных источников, являются работы M. Kopelvski (Университет Сан-Пауло, Бразилия) и недавно запущенная экспериментальная установка группы G. Muller (Университет Вупперталя, Германия).

Поэтому актуальность представленной диссертационной работы, направленной на создание новой методики исследования полевых эмиттеров и проведение экспериментальных исследований современных многоострийных эмиттеров большой площади не вызывает сомнения. Кроме того, разработка физико-математических моделей, описывающих сложное многопараметрическое функционирование LAFE при различных условиях эксплуатации, причём обработка экспериментальных ВАХ по этим моделям происходит в режиме реального времени, является особенно актуальной и масштабной задачей.

Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна

Большинство полученных автором результатов имеют не только несомненную научную новизну, но действительно разработаны и осуществлены впервые, особенно в практике экспериментальных исследований многоострийных полевых эмиттеров.

Так в работе впервые предложена и реализована аппаратно-программная методика многоканального сбора данных одновременно с онлайн обработкой токовых и визуальных эмиссионных характеристик, а также параметров условий функционирования эмиттеров.

Обнаружены и исследованы различные формы гистерезиса эмиссионных характеристик в различных режимах питания. На основе одновременной регистрации вольтамперных характеристик и масс-спектрометрических данных предложена модель, объясняющая наблюдаемые виды гистерезиса и механизмы перехода из одного типа гистерезиса в другой. Предложена феноменологическая адсорбционно-десорбционная модель гистерезиса, расчёты по которой подтверждают правильность предложенной модели.

Получены новые данные о статистике распределения эмиссионных структур на основе онлайн обработки ВАХ путём построения облаков данных в координатах наклон-отсечка.

С применением масс-спектрометрического комплекса были получены новые данные

о механизме формирования эмиссионных структур при случайных вакуумных пробоях в ходе тренировки, а также при длительном режиме работы LAFE.

Впервые были экспериментально исследованы различные виды многоострийных и одноострийных эмиттеров с использованием критерия на соответствие режиму полевой эмиссии.

Впервые были получены локальные вольт-амперные характеристики на основе онлайн обработки эмиссионных изображений LAFE (т.н. картин свечения).

Была предложена новая запись основного уравнения полевой эмиссии, не содержащая табулированных значений и в единой системе международных единиц.

Предложены и использованы модифицированные координаты Фаулера-Нордгейма (координаты Мерфи-Гуда) для обработки ВАХ и анализа соответствия эмиссионному режиму работы многоострийных полевых эмиттеров.

Достоверность результатов, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность 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 подтверждается согласием расчётных данных, 3D моделирования и экспериментальных результатов.

С помощью разработанной установки были исследованы 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). Объем статистической информации о свойствах LAFE, реализованный на установке не имеет аналогов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов и выводов

Перечислим наиболее значимые для науки полученные результаты:

Разработан и реализован метод измерения и онлайн обработки 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.

Разработан ряд методов обработки вольт-амперных характеристик в онлайн режиме:

а) метод локального градиента и метод наименьшего отклонения для определения степени предэкспоненциального множителя напряжения в основной формуле полевой эмиссии;

б) метод захвата эмиссионных изображений одновременно с регистрацией макроскопической вольт-амперной характеристикой, позволяющий строить вольт-амперные характеристики индивидуальных эмиссионных центров, а также оценивать их коэффициент усиления поля и площадь эмиссии;

в) метод анализа наклон-отсечка с градуировочной сеткой (SK-анализ) к экспериментальным вольт-амперным характеристикам.

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

Экспериментально подтверждено теоретическое предсказание о двухкомпонентном распределении коэффициентов усиления поля эмиссионных центров в наноуглеродных эмиттерах большой площади. 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.

Проведена оценка температуры эмиссионных центров нанокомпозитных эмиттеров, основанная на использовании масс-спектрометрических методик термодеструкции полимерной матрицы.

С использование теории общего барьера получены формулы из семейства Фаулера-Нордгейма, удобные для обработки экспериментальных ВАХ, а также для 3D моделирования эмиссионных характеристик эмиттеров различной формы. Детально исследован формализм и подходы экспериментального определения площади полевой эмиссии многоострийных полевых катодов. Предложены и теоретически обоснованы модифицированные координаты Мерфи-Гуда для обработки экспериментальных вольтамперных характеристик.

Практическая значимость работы заключается в применении разработанного комплекса для технологической оптимизации перспективных эмиттеров. Проведено исследование нескольких партий технологических LAFE на основании договорных и инициативных научно-технических работ.

Основным практическим результатом работы является созданный аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс с разработанными методиками для изучения свойств LAFE с учётом явлений, сопровождающих полевую эмиссию. Можно сделать вывод, что разработанная и реализованная методика исследования LAFE является очень важной для развития отечественной науки в области вакуумной наноэлектроники.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов к каждой главе, общего вывода из работы, списка литературы и специально выделенного списка авторских публикаций и свыше десятка приложений. Основной текст диссертации изложен на 253 страницах, а общий объем диссертация с учётом Приложений и списка литературы составляет 310 страниц.

В **введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы цели её и задачи, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость, личный вклад автора, основные положения, выносимые на защиту, а также обширные сведения об апробации работы.

В **первой главе**, названной "Разработка базовых уравнений для комплексной методики исследования LAFE" проводится систематизация базовых подходов и ограничений теории полевой эмиссии. Анализируются современные представления о видах барьерной электронной эмиссии.

В главе автором разработан вывод основной формулы полевой эмиссии, в основе которого лежат современные представления о математической связи барьера элементарной формы и общей формы (general-form barrier). Результатом являются лаконичные по форме формулы полевой эмиссии, удобные для теоретического и экспериментального анализа. Выведенные в работе формулы служат основой для экспериментальных оценок характеристик LAFE (в том числе в режиме реального времени).

Практическим результатом теоретических рассмотрений, является обработка экспериментальных данных с использованием специальных математических функций полевой эмиссии, как в координатах Фаулера-Нордгейма (FN-plot) на основе модифицированной формулы Элинсона-Шредника (ES – Elinson-Shrednik), так и впервые реализованных для обработки вольт-амперных характеристик новых координат Мерфи-Гуда (MG-plot), которые показали наилучшую оперативность для обработки большого потока экспериментальных данных.

Во **второй главе** диссертации, носящей название "Исследование LAFE", автором раскрывается обширный опыт исследования многоострийных эмиттеров, имеющих стохастическую природу, в том числе, образующих сплошные покрытия. Важным

результатом исследований широкого круга LAFE эмиттеров можно считать их сравнительную оценку. Для проведения фундаментальных исследований и разработки комплексной методики исследования LAFE автором был выбрали наиболее оптимальный эмиттер – LAFE на основе нанокомпозитов с углеродными наночастицами, которые дают достаточно стабильные и достаточно высокие эмиссионные токи.

В главе 3 ("Разработка комплексной методики исследования полевых эмиттеров") обосновывается актуальность и практическая значимость исследования LAFE, а также проблемы в их исследовании. Обстоятельно описывается процесс становления методики измерения и результаты исследований нанокомпозитных эмиттеров с помощью массспектрометрических методов исследования одновременно с полевыми экспериментами.

Автором вводятся принципы автоэмиссионной методики, в том числе, модульный характер обработки данных, раскрываются некоторые детали компьютеризированной методики многоканального сбора данных и их онлайн обработки. Большой интерес приставляет сравнение методики с аналогами, убедительно свидетельствующее о векторе развития и уровне современных экспериментальных исследований.

На мой взгляд, наибольшее положительное впечатление оставляет глава 4 о новейший методах обработки ВАХ. В главе разработаны не только несколько действительно новых методов обработки ВАХ LAFE, но получены новые научные данные. Это статистический анализ ВАХ LAFE, SK-анализ, гистерезис ВАХ и массспектрометрические данные, тест на соответствие полевой эмиссии, исследование двухкомплектного набора ВАХ, концепции площади эмиссии и оценка эффективной площади, локальные ВАХ, построение эмиссионного профиля эмиттера, оценка качества эмиссионный поверхности, определение степени k предэкспоненциального множителя напряжения, координаты Мерфи-Гуда.

Глава 4 не только самая большая в диссертации, но имеет особое значение, так как является фактически апробацией разработанной методики, подтверждает правильность выдвинутых в ней идей и принципов, имеет огромный потенциал в развитии.

Замечания по диссертации

Первое замечание относится к оформлению материала диссертации. Некоторые рисунки выполнены слишком плотно и содержат вставки, которые следовало бы выносить в отдельные иллюстрации. Это касается, например, рисунков 3.15, 4.8, 4.9, 4.31, 4.36, 4.37.

Недостатком работы можно назвать большое многообразие проведённых исследований, однако все они укладываются в общую концепцию применения инструментов многоканальной регистрации и онлайн обработки данных.

Разработанные теоретические формулы для расчёта автоэмиссионного тока с учётом

функциональной зависимости от поля специальных функций v и t имеют несущественное расхождение с их более грубым приближениями по сравнению с вкладом побочных эффектов, не имеющих чётких математических выражений в основной формуле (адсорбционные процессы, многообразие форм эмиссионных центров в общей матрице катода, шумовой вклад в уровень приложенного напряжения и т.д.). Обработка реальных ВАХ не привело к доказательству необходимости применения более точной формулы при оценке параметров катода.

Очевидно, что указанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общую высокую оценку работы.

Общие выводы

Диссертация Попова Евгения Олегович является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-методическом уровне. Представлен большой объем новых экспериментальных результатов и проведён их анализ. Работа решает крупную научную задачу по созданию методики исследования современных полевых эмиттеров.

Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих журналах, в том числе в нескольких десятках публикациях, имеющих индексацию в системе WoS. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Все это даёт основание утверждать, что диссертационная работа Попова Евгения Олеговича «Методика и результаты исследования многоострийных полевых эмиттеров большой площади» полностью соответствует требованиям и критериям к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в пункте 9 «Положения о присуждении учёных степеней», которое было утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а также «Положению о присуждении учёных степеней в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН» от 19 августа 2019 г. (на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 № 1792-р), и автор диссертации Попов Евгений Олегович заслуживает присуждения искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 — физическая электроника.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук
профессор, заведующий кафедрой
моделирования электромеханических и
компьютерных систем

Егоров Николай Васильевич



10 разреш
дока жадко
на
обличие РАН
11.11.2019

Адрес:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Университетская набережная, д. 7–9,
Санкт-Петербург, 199034

Тел.: (812) 428-42-35

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

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

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей