

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию
Попова Евгения Олегович
«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 исследования полевых эмиссионных источников электронов определяется важностью разработок по созданию новых изделий вакуумной наноэлектроники, устойчивых к работе в условиях высоких температур и космической радиации. Полевые эмиссионные источники электронов с высокими значениями полного электронного тока и большими макроскопическими плотностями тока активно разрабатываются для использования в X-тай приборах, таких как портативные рентгеновские трубки, источники рентгеновского излучения для медицинской 3D томографии, лазеры на свободных электронах и т.д. Безынерционный отклик на внешнее световое возбуждение делает полевые эмиттеры ключевым элементом THz приборов. В ряде работ сообщается об использовании полевых эмиттеров в традиционных устройствах СВЧ электроники: лампах бегущей волны, кристаллах и магнетронах. Полевые источники могут служить газовыми ионизаторами в компактных масс-спектрометрических установках, нейтрализаторами заряда в двигателях ориентации в космических кораблях, транзисторов с изолированным вакуумным управляющим электродом и других изделиях вакуумной наноэлектроники. Весьма перспективными приборами являются полевые эмиссионные дисплеи (FED) и катодолюминесцентные источники света.

Большие токи полевой электронной эмиссии можно получить при использовании многоострийных полевых эмиттеров, или, как их называют в международном сообществе, эмиттеров большой площади (LAFE – large area field emitter). Однако прогрессу в практическом применении LAFE мешают две проблемы, которые связаны с методологическими подходами к их исследованию.

Первая связана с общими вопросами теории полевой эмиссии, в том числе – применимости базовых формул полевой эмиссии к описанию современных многоострийных эмиттеров. Вторая проблема обусловлена сложностями экспериментальных подходов к регистрации вольтамперных характеристик (BAX) LAFE и алгоритмов их обработки с целью определения ключевых характеристик, таких как коэффициент усиления поля и площадь эмиссии. Известно, что многоострийные эмиттеры демонстрируют до десятка различных параметров, которые следует учитывать и

анализировать, поэтому экспериментальные методики исследования LAFE все ещё находятся в стадии становления.

Диссертация Попова Е.О. посвящена разработке новой методики исследования полевых эмиттеров большой площади для построения физико-математических моделей, описывающих их многопараметрическое функционирование при различных условиях эксплуатации, а также созданию аппаратно-программного научно-исследовательского комплекса для фундаментальных экспериментальных исследований и технологической оптимизации изготовления полевых эмиттеров.

Работа Попова Е.О. представляет собой крупный шаг в развитии этого направления и важный вклад в понимание фундаментальных закономерностей функционирования LAFE, что определяет её несомненную научную актуальность.

Научная новизна рецензируемой работы заключается как в получении ряда принципиально новых экспериментальных результатов, так и в предложении новых методов исследования. Перечислим некоторые, наиболее яркие результаты:

- разработана новая экспериментальная методика, позволяющая обрабатывать большие объёмы данных об эмиссионных характеристиках и явлениях, сопутствующих полевой эмиссии непосредственно в ходе эксперимента. В результате экспериментатор получил недоступные ранее возможности для анализа и оперативного управления экспериментальными исследованиями;
- создана экспериментальная установка, обеспечивающая многоканальный сбор информации с различных датчиков, синхронизацию сбора данных от быстрых и медленных измерительных устройств, защиту экспериментального оборудования от высоковольтных разрядов;
- внедрена масс-спектрометрическая методика для исследования десорбционных процессов, сопровождающих полевую эмиссию;
- внедрена модульная система онлайн обработки вольтамперных характеристик с применением различных физико-математических моделей полевой эмиссии;
- реализованы визуализация эмиссионного процесса и онлайн обработка картин свечения;
- внедрены теоретические подходы к анализу экспериментальных данных в комплексную методику исследования реальных эмиттеров, включая синтез и подгонку вольт-амперных характеристик в режиме онлайн;
- определены микроскопические параметры полевых эмиттеров на основе макроскопических измерений, выявлены связи их эволюции с условиями эксплуатации;
- построены феноменологические и численные модели, описывающие поведение

- эмиттеров большой площади, включая 3D моделирование эмиссионных структур;
- исследованы тонкая структура и особенности вольт-амперных характеристик в различных режимах высоковольтного питания.

Практическая значимость работы заключается в применении разработанного комплекса для технологической оптимизации перспективных эмиттеров. Основным практическим результатом работы является созданный аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс в совокупности с разработанными методиками для изучения свойств LAFE, которые учитывают явления, сопровождающие полевую эмиссию.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на ведущих международных конференциях по полевой эмиссии (в первую очередь на проводимой ежегодно международной конференции по вакуумной наноэлектронике IVNC), а также нескольких всероссийских и региональных конференциях.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и отдельно выделенный перечень из 71 публикации автора из рекомендованного списка для докторской диссертации, 30 опубликованных тезисов конференций, а также содержит 14 приложений. Объем диссертации составляет 310 страниц, в текст работы включены 137 рисунков и 12 таблиц.

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

В **Главе 1** диссертации проведена разработка базовых уравнений для комплексной методики исследования LAFE, чётко и ясно даётся систематизация базовых подходов и ограничений теории полевой эмиссии. Анализируются современные представления о видах барьерной электронной эмиссии. Рассматриваются основные этапы и вектор направления развития теоретических и экспериментальных исследований полевых источников электронов. Ставится целью выведение формул полевой эмиссии так называемого семейства формул Фаулера-Нордгейма (FN-type) в системе международных единиц, чётких по структуре и удобных для использования в разработанной экспериментальной комплексной многоканальной методике записи и обработки ВАХ в режиме реального времени, а также для 3D моделирования эмиссионной способности эмиттеров различной формы. Для этого проводится переформулирование основного уравнения полевой эмиссии, с применением предложенного в 2004 метода барьера общей формы (general barrier).

С использованием специальных математических функций полевой эмиссии (Форбса-Дина), аппроксимирующих v и t , сформулировано полное инженерное уравнение полевой

эмиссии для безразмерного поля f и без табулированных значений, где все константы записаны в системе СИ. В результате, экспериментальная методика была обеспечена различными видами представления основной формулы полевой эмиссии в безразмерном, полуразмерном и размерном виде.

В главе последовательно разобраны три основных ограничения теории Мерфи-Гуда с точки зрения применения их для анализа эксперимента – поле снятия барьера Шоттки-Нордгейма, неравенство Мерфи-Гуда и практический диапазон полей. Представлен вывод формулы плотности тока эмиссии для режима BTE (barrier top emission), когда значительная часть электронов идёт с уровней вблизи вершины или несколько выше барьера. Вывод произведён с использованием обозначений теории барьера общей формы. В результате в главе представлены диапазоны напряжённостей полей, при которых теория Мерфи-Гуда является непротиворечивым описанием полевого эмиттера. За пределами этих границ эмиссия электронов должна обеспечиваться дополнительными условиями: в первую очередь высокой температурой или участием адсорбционных процессов.

Глава 2 посвящена исследованию LAFE. В начале даётся краткая классификация эмиттеров большой площади и сравнение данного понятия с многоострийными эмиттерами. Глава раскрывает опыт исследования многоострийных эмиттеров, имеющих стохастическую природу, в том числе, образующих сплошные покрытия.

В работе был создан многоострийный ЖМИ новой конструкции, стабильно работающий в режиме простой полевой эмиссии. Был получен патент на эмиттер, образованный путём протягивания жидкого металла (галлия) через поры в ядерной мемbrane.

Был предложен принцип онлайн обработки ВАХ для получения параметров эмиссионной системы непосредственно в ходе проведения эксперимента. Разработана электронная схема оцифровки временных реализаций сигналов тока и напряжения с возможностью программного опроса аналого-цифрового преобразователя в режиме реального времени. Получаемые данные демонстрировали высокую повторяемость и недоступный ранее статистический объём. Была получена длительная (несколько часов) полевая эмиссия с токами до 15 мА и макроскопической плотностью тока до 0.1 A/cm^2 в режимах синусоидального (50 и 440 Гц) высоковольтного питания.

Был разработан метод создания многоострийного жидкокометаллического эмиттера из нанопористого кристалла GaP. Твердотельный эмиттер со стохастическим массивом металлических микроострий. Эмиттер изготавливается путём химического осаждения никеля в полости треков лавсановой матрицы.

В работе были созданы эффективные нанокомпозитные полевые катоды. Так для

эмиттера с использование многостенных нанотрубок в полистирольной матрице (MWNT-PS) были получены эмиссионные токи до 125 мА.

Глава 3 (Разработка комплексной методики исследования полевых эмиттеров). В начале главы даётся краткий обзор практических применений LAFE, демонстрирующий высокую актуальность и сложность их исследования. Подчёркивается важность регистрации процессов и явлений, сопровождающих работу LAFE.

Для того, чтобы понять физические и химические процессы при работе полевых эмиттеров из нанокомпозиционных материалов в режимах с большими токами, была разработана методика, включающая в себя эмиссионные измерения, а также регистрацию состава летучих продуктов и кинетики выделения газов в измерительной камере при помощи масс-спектрометрической аппаратуры. Полученные спектры деструкции полимеров показали высокую термическую и адгезионную стойкость полистирольной матрицы в ходе работы эмиттера в режиме больших токов автоэмиссии. При этом происходит интенсивная десорбция CO и CO₂, причём ниспадающий характер ступенек кинетики парциальных давлений после каждого шага увеличения тока эмиссии указывает на очистку поверхности анода.

Был предложен и реализован метод, позволяющий оценивать температуру эмиттирующих CNT, что позволило устанавливать корреляционные зависимости между током эмиссии, природой полимерной матрицы и фактической температурой "работающих" CNT.

В Главе 3 даётся описание разработанной комплексной методики исследования LAFE. Рассмотрены принципы, лежащие в основе предложенного подхода: многоканальный сбор данных, как вольт-амперных характеристик, так и данных сопровождающих полевую эмиссию явлений; метод сканирования высоким напряжением в быстром и медленном режимах, а также исследование эмиссионного процесса *in situ*, путём программного управления и онлайн обработки данных эмиссионного эксперимента.

В Главе 4 автор приводит разработанные новые методы обработки BAX и результаты исследования LAFE. В диссертации убедительно показано, что применение компьютерной обработки во время записи BAX открывает дополнительные возможности познания эволюции и принципов работы полевого эмиттера, позволяет апробировать модели физических процессов непосредственно во время эмиссионного эксперимента.

Приведу лишь некоторые наиболее важные результаты обработки эмиссионных данных, на основе методов, разработанных и внедрённых Поповым Е.О. в технику полевого эмиссионного эксперимента:

- разработан новый метод онлайн обработки BAX, основанный на анализе SK-

диаграмм с построением градироочкой сетки для эффективных микроскопических параметров: работы выхода и коэффициента усиления поля.

- выяснены причины возникновения гистерезиса в ВАХ полевых эмиттеров. Обнаружены условия перехода от «обратного» гистерезиса к «прямому». На основании анализа ВАХ и масс-спектрометрических данных предложена феноменологическая модель процессов адсорбции-десорбции в полевой эмиссионной системе.

- экспериментально подтверждена двухкомпонентная модель распределения коэффициентов усиления поля. Дифференцирование ВАХ позволило выявить эмиссионные структуры с повышенным значением FEF.

- экспериментально применён метод оценки предэкспоненциального множителя степени напряжения в уравнении Фаулера-Нордгейма, основанный на вариации степени напряжения в координатах $\ln(I/U^k)$ vs $1/U$. Впервые применена онлайн обработка экспериментальных ВАХ в координатах Мерфи-Гуда.

- впервые в методике проведения экспериментов был применён тест для проверки соответствия измеряемых вольт-амперных характеристик закону полевой эмиссии, а, следовательно, и правомочности определения основных эмиссионных параметров (FEF и площади эмиссии).

В заключении диссертации суммированы основные полученные в работе результаты.

По диссертационной работе Попова Е.О. имеются следующие замечания:

Описание методик конкурентов и их соответствующих достижений могло быть более детальным.

Исследуемые нанокомпозитные катоды не подвергались дополнительной процедуре очистки от адсорбатов (например, высокотемпературным прогревом), также, как и анодная система. Подобные исследования обычно сопровождаются вариацией материалов, изменения взаимного расположения электродов и другими способами получения дополнительной информации.

Большие потоки экспериментальных данных, которыми оперирует разработанная измерительная система (управляющая экспериментом программа), позволяют строить гистограммы и определять наиболее вероятные значения изучаемых величин, однако точность этих измерений не указана.

Отмеченные замечания и недостатки носят дискуссионный характер, не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работы и ни в коей мере не снижают научной и практической значимости проведённых исследований.

Общие выводы

Диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении

учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, 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 является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение крупной научной проблемы по созданию методики исследования многоострийных полевых эмиттеров, имеющей большое значение для развития полевой эмиссионной электроники. Считаю, что автор диссертации Попов Евгений Олегович безусловно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Доктор физико-математических наук,
Заслуженный профессор МФТИ,
зам. заведующего кафедрой Вакуумной электроники,
зав. лабораторией вакуумной и СВЧ электроники Московского физико-технического
института

Шешин Евгений Павлович

mailto: sheshin.ep@mipt.ru, факс: 8-495-408
538-67-83, 8-916-612-91-49
141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, МФТИ, Институтский пер., 9

Подпись Шешина Е.П. заверяю:

