

**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

Стремление получить высокие токи эмиссии при низких пороговых напряжениях логично приводит к созданию эмиттеров, состоящих из множества эмиссионных центров. Исторически, эмиттеры с большим числом эмиссионных центров стали создавать из микроскопических молибденовых и вольфрамовых отдельно стоящих острый, сформированных на плоской подложке. Такие катоды, известные как катоды Спиндта (Spindt), получили название многоэмиттерных полевых катодов большой площади (LAFE – large area field emitter). Отличительным признаком LAFE является линейная связь приложенного напряжения с электрическим полем в межэлектродном промежутке.

В настоящее время отсутствует однозначная общепризнанная классификация многоэмиттерных полевых структур. Задача актуальна, в связи с тем, что появился целый ряд работ, в которых предлагаются новые физические принципы и технологии создания таких катодов. В работе в Главе 1 проведён первоклассный анализ сложившейся ситуации. Обстоятельно показаны преимущества и недостатки различных подходов к описанию LAFE. Такой полный и содержательный анализ дается впервые.

В работе приводятся конкретные количественные сведения и характеристики большинства известных эмиттеров большой площади. Несмотря на огромное количество попыток создания таких катодов, отсутствуют эффективные методики оценки параметров этих систем. Ситуация выглядит настолько неупорядоченно, что затрачивается огромное время на анализ преимуществ того или иного типа катодов, их конкретных эмиссионных свойств (пороговых значений эмиссии, значений плотности тока, формы вольт-амперных характеристик, стабильности амплитудных значений тока и напряжения во времени, определение основных параметров эмиссионной системы, таких как эффективные значения площади эмиссии и коэффициентов усиления поля, затрудняется проверка качества однородности электронной эмиссии и т.д.).

В работе Попова Е.О. такая полноценная многофункциональная система определения этих параметров была создана. Характерной особенностью является предложенная автором методика исследования в переменных полях. Этот подход имеет значительные преимущества по сравнению со стационарным. Он позволяет стабилизировать условия проведения эксперимента и снижает требования к вакуумным условиям. Разработанная и реализованная методика существенно облегчает и упрощает все измерения, делает их менее зависимыми от степени очистки электродов. Использование режима переменных токов позволяет упростить эксплуатацию для многих практических задач.

Методика фактически позволяет оценить все параметры одновременно, тогда как в обычном режиме это потребовало бы многих часов. В международной практике подобной нет методики, которая позволяет обрабатывать эмиссионные данные и получать полный набор необходимых параметров в режиме реального времени. На основании выше сказанного, считаю, работа Попов Е.О. является несомненно **актуальной**.

**Научная новизна** представленной диссертационной работы заключается в предложении новых методов исследования полевых катодов. Новым является разработанная диссидентом комплексная многоканальная система сбора и обработки данных в режиме реального времени.

Эта методика применима как для исследования одноострийных полевых эмиттеров,

так и для эмиттеров большой площади. Диссертантом сконструированы и созданы измерительные стенды, обеспечивающие многократную регистрацию вольт-амперных (ВАХ) посредством прецизионного сканирования высокого напряжения, подаваемого на объект.

Разработан ряд методов обработки ВАХ в реальном времени, обеспечивающих возможность анализировать их в онлайн режиме:

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

б) метод синхронной регистрации эмиссионных изображений одновременно с записью макроскопических вольт-амперных характеристик. Это позволяет регистрировать вольт-амперные зависимости для каждого индивидуального эмиссионных центра, а также оценивать локальный коэффициент усиления поля и площадь эмиссии;

в) метод анализа многоэмиттерных катодов в координатах наклон-отсечка (на основании обработки данных в координатах Фаулера-Нордгейма) с построением градуировочной сетки в режиме реального времени для определения эволюции коэффициента усиления поля и работы выхода.

Впервые экспериментально применён в режиме реального времени тест на соответствие эмиссии полевому режиму. Экспериментально подтверждено теоретическое предсказание о двухкомпонентном распределении коэффициентов усиления поля эмиссионных центров вnanoуглеродных эмиттерах большой площади. Разработан метод оценки соотношения коэффициентов усиления поля этих компонент.

Впервые для оценки устойчивости и стабильности матричных многоэмиттерных катодов применён чувствительный метод времяпролётной масс-спектрометрии нейтральных молекул. Показано, что до предельных плотностей токов не наблюдается каких-либо следов полевой десорбции или термдеструкции материала катода.

Детально исследован формализм и подходы определения площади полевой эмиссии многоострийных полевых катодов.

**Практическая значимость** работы заключается в применении разработанного комплекса для анализа перспектив создания различного типа многоэмиттерных катодов и их технологической оптимизации. Одним из важных практических результатов работы является созданный аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс, объединяющий разработанные методики в единую систему.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на крупных международных и российских конференциях по вакуумной наноэлектронике, и в целом ряде ведущих организаций по теме диссертации. Автор и руководимый им коллектив является победителем ряда конкурсов российских грантов.

**Структура диссертации и публикации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и 14 приложений. Объем диссертации составляет 310 страниц, в текст работы включены 137 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 370 наименований, а также дополнительно отдельно выделенный список оригинальных работ автора по теме диссертации, который составляет 71 публикацию. Из данного списка 58 публикаций индексируются в Web of Science, 30 работ цитируются в опубликованных тезисах конференций. Я присутствовал на целом ряде данных конференций и могу свидетельствовать о высокой оценке этих работ участниками этих конференций.

Во **введении** обоснована актуальность и важность диссертационного исследования для вакуумной наноэлектроники, рассмотрены ближайшие зарубежные аналоги и конкуренты, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность и практическая значимость результатов работы, приведены сведения об апробации работы, личный вклад автора.

**В первой главе** диссертации автором приводятся теоретические исследования. Путём применения метода общего барьера, введения безразмерного поля и общего барьерного фактора получена серия уравнений для плотности эмиссионного тока для различного вида представления полей (размерном, полуразмерном, безразмерном), в системе международных единиц.

В результате анализа предельных полей полевой эмиссии получены диапазоны напряжённостей полей, при которых теория Мерфи-Гуда является оправданной для описания.

Практическим результатом теоретического анализа является обработка экспериментальных данных с использованием специальных математических функций полевой эмиссии, как в традиционных координатах Фаулера-Нордгейма на основе модифицированной формулы Елинсона-Шредника, так и впервые реализованных для обработки вольт-амперных характеристик в координатах Мерфи-Гуда. В работе было показано, что эти подходы оказываются наиболее эффективными для обработки большого массива экспериментальных данных.

Результатами **второй главы** явились исследования широкого круга многоострийных эмиттеров, разработанных диссидентом. Особо хотел бы отметить оригинальную разработку многоострийных жидкотекущих (ЖМИ) эмиттеров на основе трековых мембран и нанопористого GaP. Диссидентом были исследованы твердотельные никелевые эмиттеры, созданные на основе трековых мембран. Исследованы также тонкоплёночные полимерные эмиттеры и плёночные нанокомпозиты на основе углеродных наночастиц и полимеров. ЖМИ эмиттеры исследованы как в режиме автоэлектронной, так и взрывной эмиссии.

**В третьей главе** описана новая уникальная методика исследования многоострийных полевых катодов, основывающаяся на многоканальной системе сбора и обработки данных.

В результате диссертационной работы разработан и создан целый ряд измерительных стендов, обеспечивающих быстрый анализ эмиссионных закономерностей.

Как отмечалось выше, выполнены оригинальные масс-спектрометрические исследования нанокомпозитных эмиттеров из углеродных нанотрубок и различных полимерных материалов.

**Четвёртая глава** диссертации фактически является экспериментальной апробацией предложенной методики исследования, на широком круге матричных многоострийных катодов, с использованием различных тарифицированных углеродных нанотрубок, графеноподобных структур.

Экспериментально подтверждена двухкомпонентная модель распределения коэффициентов усиления поля (T. De Assis).

Разработана методика построения эмиссионного профиля поверхности LAFE и анализа качества распределения эмиссионных центров путём накопления данных картин свечения.

В заключении я хотел бы высказать следующие замечания и дать оценку диссертационной работе Попова Е.О.

Работа производит в целом очень хорошее впечатление. Это большое очень полезное исследование. В тоже время, как ко всякой большой работе, к ней можно высказать определённые замечания.

В качестве объектов исследования в работе использованы металлы, полимеры и углеродные нанокластеры. Что касается металлов и полупроводниковых структур, то использованная в работе при обсуждении результатов современная усовершенствованная теория полевой эмиссии, основанная на идеях Фаулера-Нордгейма и поправок док. Р. Форбса достаточно правомерна. Что касается углеродных нанотрубок и ряда углеродных материалов, графенов и графеноподобных структур, то здесь однозначное применение

теории Фаулера-Нордгейма вызывает определённые сомнения. Это не является прямым упрёком в адрес автора. Это скорее комментарий, поскольку однозначная интерпретация механизма полевой эмиссии из этих материалов в настоящее время отсутствует.

Считаю также, что было бы полезно в диссертации более подробно осветить технологии изготовления матричных катодов и особенности катодов.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что данные замечания не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работы и не снижают научную и практическую значимость проведённых исследований.

Диссертация Евгения Олеговича Попова по своему объёму, содержанию и результатам полностью соответствует требованиям ВАК, изложенных в «Положении о присуждении учёных степеней» №842 от 24.09.2013 года и «Положению о присуждении учёных степеней в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН» от 19.08.2019 г. на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 №1792-р. Диссертационное исследование Е.О. Попова является важной и актуальной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение крупной научной проблемы, связанной с разработкой и созданием комплексной методики исследования и тарификации многоэмиттерных полевых катодов большой площади. 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, профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
Профессор кафедры физики СПбГУТ,  
Лауреат Государственный премии

Фурсей Георгий Николаевич

193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1,  
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, тел.: (812) 305-12-59,  
e-mail: g.fursey@gmail.com

Подпись

*Гурсей Г.Н.*  
ЗАВЕРЯЮ  
Ведущий специалист по кадрам  
СПбГУТ

02.03.2024

