

ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А, Санкт-Петербург, 198095, почтовый адрес: Санкт-Петербург, 190103, а/я 207
тел.: (812) 363-0719, факс: (812) 363-0720, e-mail: iap@ianin.spb.su, www.iairas.ru
ОКПО 04699534, ОГРН 1027810289980, ИНН 7809003600, КПП 780501001

15.03.2023 № 10349-89/101

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИАП РАН,
доктор технических наук

А.А. Евстапов

«15» марта 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института аналитического приборостроения Российской академии наук
на диссертационную работу **Филиппова Сергея Владимировича**
«Разработка методов определения основных эмиссионных параметров наноструктурированных полевых эмиттеров», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 — «Физическая электроника»

Актуальность темы диссертации

Сегодня на основе полевых эмиттеров разработаны прототипы миниатюрных масс-спектрометров, датчиков касания и давления. Активно проходит тестирование космических двигателей с нейтрализаторами на полевых катодах. Кроме того, за пределами лабораторий уже существуют и активно используются реальные устройства, такие как компьютерные томографы и компактные рентгеновские аппараты с низкой дозой облучения, серийные приборы по досмотру багажа. Однако практическое применение полевых катодов в значительной степени ограничивается невозможностью достижения высоких токов эмиссии, сравнимых с токами термоэмиссионных катодов. Основными причинами ограничения токов эмиссии современных наноразмерных эмиттеров являются: (а) расхождение экспериментальных результатов и теоретических расчётов из-за неприменимости методов описания эффекта полевой эмиссии; (б) несовершенством подходов по определению основных эмиссионных характеристик — коэффициента усиления поля, площади эмиссии и работы выхода эмиттера; (в) нестабильность эмиссионных характеристик из-за ряда эффектов, сопровождающих работу

полевых катодов в техническом вакууме. Поэтому разработка экспериментальных и теоретических методов определения основных эмиссионных параметров является одной из ключевых задач вакуумной электроники.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, благодарностей, списка сокращений и списка использованной литературы, включающего 197 наименований. Полный объем диссертации составляет 134 страницы, включая 69 рисунков и 16 таблиц.

Во введении показана актуальность избранной темы и цели диссертационной работы, а также решаемых в её рамках задач. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также отражен личный вклад автора и приведены формальные сведения об апробации работы и список публикаций автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы, в частности: освещены этапы развития и современное состояние полевой эмиссионной науки; даны определения основных эмиссионных параметров (коэффициент усиления поля, площадь эмиссии, работа выхода); показано, что степень предэкспоненциального множителя напряжения k также является важным параметром (как в экспериментальном, так и в теоретическом смысле) и зависит от нескольких факторов; рассмотрены перспективные структуры и материалы эмиттеров большой площади. В заключении главы 1 приводится список актуальных задач в области полевой эмиссии.

Во второй главе приводится описание объектов исследования – одноострийных вольфрамовых эмиттеров и эмиттеров большой площади на основе нанокompозитов углеродных нанотрубок и графена в полимерной матрице – и процедуры их изготовления. Рассмотрено устройство экспериментальной установки и методики для изучения эмиссионных свойств полевых эмиттеров.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования эмиттеров различной формы: одиночные острия, лезвийные эмиттеры, массивы или кластеры острий. На основе проведенных расчётов была разработана универсальная формула по определению коэффициента усиления поля на вершине острийных эмиттеров различной геометрии. Определены оптимальные формы лезвийного эмиттера и массива острий с максимальным значением площади эмиссии и практически однородным распределением токовой нагрузки по остриям в массиве соответственно.

Разработаны новые координаты для обработки ВАХ с учетом функциональной зависимости площади эмиссии от напряженности электрического поля и метод определения формы эмиттера по его экспериментальному значению параметра сдвига

степени KA .

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию активации полевых эмиттеров большой площади и изучению переходных процессов при ступенчатом изменении уровня приложенного напряжения. Продемонстрировано, что применение комплексного подхода к исследованию эмиттера – регистрации полевых эмиссионных (запись ВАХ и картин свечения полевого эмиссионного проектора) и масс-спектрометрических данных – позволяет контролировать процесс разрушения материала эмиттера, а также следить за изменениями работы выхода отдельных эмиссионных центров.

Представлен алгоритм исследования и измерения, позволяющий проводить эффективное сравнение эмиссионных свойств различных эмиттеров.

В заключении диссертации подробно представлены основные результаты работы.

Научная новизна и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. На основе проведённых расчётов разработана универсальная формула для определения коэффициента усиления поля на вершине эмиттера в широком диапазоне геометрических параметров: аспектного соотношения на вершине $\sigma_{apex} \in [1.01; 1000]$ и полуугла при вершине $\theta \in [2^\circ; 20^\circ]$.

2. Определена оптимальная форма лезвийного катода, которая обеспечивает максимальное значение условной площади эмиссии при фиксированном значении полного тока эмиссии. Предложен новый эллипсоидальный профиль распределения высот остриёв в массиве, который обеспечивает оптимальное равномерное распределение токовой нагрузки по остриям.

3. Впервые разработана экспериментальная методика определения формы острия по его ВАХ, основанная на накоплении статистических данных в координатах $\ln(I_m/J_k)$ и $\ln(f_a)$.

4. Предложена степенная зависимость условной площади эмиссии от напряжённости поля. Впервые разработаны новые координаты для определения эмиссионных параметров полевых катодов.

5. Разработан пошаговый алгоритм исследования и сравнения свойств многоострийных эмиттеров.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием экспериментальных результатов с численным моделированием и расчетами. Надежность моделирования обеспечивается совпадением результатов моделирования и аналитических расчетов. Результаты работы были представлены и апробированы на нескольких Российских и международных научных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных научных базах (Scopus, Web of Science).

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.

Полученные в работе научные результаты могут быть использованы при разработке, конструировании и изготовлении полевых эмиттеров большой площади, разрабатываемых в научно-исследовательских институтах и применяемых в следующих организациях: Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, АО «НПП «Торий», АО «НПП «Алмаз», АО "НПП "Контакт" и др.

По диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. При описании пиков на масс-спектре автор ассоциирует их с нейтрально заряженными молекулами, в то время как в масс-спектрометре обычно регистрируются положительно заряженные частицы – ионы.

2. Изменение концентрации паров воды на рисунке 62 для первых двух ступеней тока убывает, вследствие чего это происходит? Какие значения были приняты в качестве фоновых для данных показанных на рисунке 62?

3. Одним из объектов исследования был нанокompозитный эмиттер на основе многослойных графеновых пластин. Проводились ли исследования, например, с помощью Рамановской спектроскопии, чтобы удостовериться, что полученные структуры являются графеновыми, а не графитовыми пластинами.

4. Есть замечания к оформлению диссертации. На рисунке 59а на оси ординат P (мкТорр) указаны отрицательные значения давления. В подписи к рисунку 31 и в тексте работы формы эмиттеров обозначены по-разному: Para – Par, Нурег – Нур.

Следует отметить, что вышеуказанные замечания не носят принципиального характера и не затрагивают справедливость сделанных в работе выводов и не меняют общей положительной оценки диссертационной работы соискателя.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с исследованием классических и современных полевых эмиттеров. Автором применены надежные методы моделирования и экспериментального исследования, обобщены результаты всех проведенных исследований, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы.

Заключение

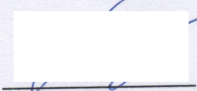
Диссертационная работа Филиппова Сергея Владимировича «Разработка методов определения основных эмиссионных параметров наноструктурированных полевых эмиттеров» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней» в Федеральном государственном бюджетном учреждении наук Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук пп.2.1-2.5 (от 20.12.2021 г.), а её автор, Филиппов Сергей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Диссертационная работа С.В. Филиппова была рассмотрена и обсуждена на Объединенном научном семинаре лабораторий Приборов и методов эпитаксиальных нанотехнологий (лаб.211), Оптики заряженных частиц и математического моделирования (лаб.221), Информационно-измерительных био- и хемосенсорных микросистем (лаб.232) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук 03 марта 2023 года.

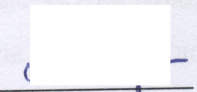
Настоящий отзыв был обсужден и принят на заседании Научного семинара ИАП РАН, протокол № 3 от 03 марта 2023 года.


Отзыв подготовил:

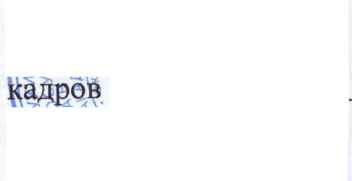
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаб.232 ИАП РАН
Тел. +7(921) 6680332
E-mail: antbulyan@yandex.ru

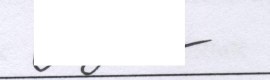

Буляница А.Л.

Председатель Научного семинара:
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник ИАП РАН


Явор М.И.

Подписи Буляницы  и Явора Михаила Игоревича **УДОСТОВЕРЯЮ.**

Начальник отдела  кадров


Шванова Е.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт аналитического приборостроения Российской академии наук
198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А
Тел. +7 (812) 363-0733