

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Чепусова Александра Сергеевича
«СВОЙСТВА АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО ВАКУУМА»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Актуальность работы. Применение автоэмиссионных катодов для замены накаливаемых позволит отказаться от источников питания для накала, что может упростить конструкцию и повысить энергоэффективность устройства в целом. Генерация потоков электронов с узким спектром кинетических энергий также полезна для ряда практических приложений. Таким образом, работа, исследующая свойства автоэмиссионных катодов из разных углеродных материалов, является актуальной.

Автором исследованы свойства автоэмиссионных катодов из промышленных конструкционных графитов, обнаружены закономерности работы эмиттеров в различных условиях эксплуатации. В экспериментах достигнут ток эмиссии порядка нескольких миллиампер с площади около 10 мм², показаны режимы работы с восстановлением эмиссионных свойств катодов. При стабилизации эмиссионного тока на уровне 1 мА достигнута работоспособность катода более 100 часов при постепенном снижении рабочего напряжения.

На основе данных спектроскопического исследования выявлено формирование алмазоподобных структур на поверхности катода, сделаны выводы об их положительном влиянии на эмиссионные характеристики.

Полученные результаты экспериментов использованы для разработки рентгеновского источника с автоэмиссионным катодом из графита.

Диссертация Чепусова А.С. состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 133 страницах, содержит 104 рисунка и 2 таблицы. Список литературы включает 101 наименование.

Во **введении** сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность исследований, показаны потенциальные сферы их применения. Отмечена научная и практическая значимость работы, научная новизна.

В **первой главе** приведен анализ исследований, посвященных изучению автоэмиссионных свойств наноструктурных углеродных катодов, проблем их применения. Рассмотрены возможности решения этих проблем при использовании массивных катодов из графита, формулируются задачи исследования.

Во второй главе приведено описание объектов исследования, установки, а также методики экспериментов. Основными образцами для экспериментов выбраны промышленные конструкционные графиты марок GS-1800, ГЭ, МГ, ГМЗ, МПГ-7.

Исследовательская установка построена на базе вакуумного поста ВУП-4М и позволяет получать вольт-амперные характеристики материалов, изучать стабильность работы в течение длительного времени при определенных условиях, анализировать площадь эмиссии, производить напуск газовой смеси в камеру для воздействия на образцы ионами остаточных газов и др.

Глава 3 посвящена изучению автоэмиссионных свойств катодов из углеродных материалов. Большую часть раздела занимают результаты экспериментов с промышленными графитами. Рассмотрены свойства автоэмиссионных катодов в высоком вакууме, а также в атмосфере инертного газа вплоть до давления 10^{-2} Па. Для некоторых режимов работы наблюдается восстановление автоэмиссионных свойств после ионной бомбардировки катода.

В 4 главе описаны исследования электронной структуры приповерхностного слоя катода, участвующего в автоэмиссионных процессах. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) получены спектры для катодной и исходной поверхности образца.

Анализ проведен для промышленных графитов, а также компонентов, их составляющих. На всех спектрах обнаружены особенности, свидетельствующие об изменении электронной структуры поверхностного слоя катода. Наблюдаются изменения обзорных спектров, трансформация $C1s$ -линии, спектров плазменных потерь, валентной полосы и оже-линий. Характер модификации электронной структуры поверхности говорит о формировании алмазоподобных включений с sp^3 -гибридизацией на исходной графитовой поверхности с sp^2 -связями.

В главе 5 представлен рабочий макет рентгеновской трубки с автоэмиссионным катодом из графита, результаты её испытаний. Получены спектры выходного излучения с характеристическими линиями материала анода, построен профиль интенсивности, по которому определен размер фокусного пятна в 1,8 мм. Проведенные испытания работы рентгеновского источника при повышенном давлении остаточных газов демонстрируют ухудшение рабочих параметров при напуске аргона до 10^{-2} Па. Но свойства излучателя почти полностью восстанавливаются при откачке вакуумного объема.

В **заключении** автором сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

В качестве результатов, обладающих признаками **научной новизны**, следует отметить разработку рентгеновского источника с автоэмиссионным катодом из конструкционного графита, а также экспериментальные вольт-амперные характеристики катодов, полученные с помощью оригинального измерительного стенда. Новизной обладают результаты исследования поверхности углеродных автоэмиссионных катодов - формирование алмазоподобных включений при описанных условиях.

Практическая значимость определяется созданием экспериментальной установки для исследования эмиссионных свойств различных материалов, разработкой методики для изучения автоэмиссионных катодов. Полученные экспериментальные данные позволяют сформулировать рекомендации по выбору материала автокатада для поставленных задач. Разработан, с учётом полученных данных, рентгеновский источник с автоэмиссионным катодом из конструкционного графита.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением известных современных исследовательских методов и оборудования, удовлетворительным теоретическим обоснованием экспериментальных данных. Работы автора по данной теме представлены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, и доложены на всероссийских и международных научных конференциях.

Диссертация адекватно структурирована, легко читается, изложена грамотным техническим языком и оформлена в соответствии с необходимыми требованиями.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По материалу диссертационной работы имеются следующие **замечания**.

1. При описании экспериментального оборудования встречается избыточно подробное описание ряда систем, например, приведена схемная реализация регулятора температуры подогревателя катода на основе ШИМ и расчёт трансформатора для него. Как влияют особенности схемного исполнения на эмиссионные свойства катодов, не описывается.
2. Вакуумная установка, схема которой представлена на рис. 29, стр. 50, использует паромасляный диффузионный насос НД-160. Об использовании азотной ловушки или иной системы для ограничения попадания паров вакуумного масла в рабочий объём не сообщается. Не сообщаются также

характеристики натекаателя для напуска аргона и методика его применения для установки равновесного давления остаточной атмосферы в рабочей камере. Натекаатель присоединен к рабочей камере без буферного объёма, что может приводить к колебаниям скорости натекаания. В работе не описано, как учитывалось влияние паров вакуумного масла и возможные колебания скорости натекаания аргона при обработке результатов экспериментов.

3. Не указано, какое количество экспериментов проводилось с одним образцом катода для оценки повторяемости характеристик и их зависимости от механической обработки поверхности катода – «шлифуется наждачной бумагой шероховатостью 2500 зерен на 1 мм».

4. Изображения, полученные измерительной ячейкой с люминесцентным экраном (рис. 85, стр. 94), показывают, что эмиссия электронов наблюдается, в основном, на периферийных областях катода. Это может являться следствием локального усиления электрического поля на границе катод-катододержатель. Согласно описанию, цилиндрический катод диаметром 4 мм выступает над плоскостью катододержателя на 0,2 мм при зазоре $0,5 \pm 0,1$ мм, тем самым ступенчато меняя общую напряженность поля на 30-50% в промежутке. Влияние такой неоднородности поля на периферии катода, «краевой эффект», в работе не рассмотрено, однако может объяснять превышение значения экспериментального « β -фактора» по отношению к расчётному.

5. Дозовые характеристики разработанной рентгеновской трубки измеряли с помощью дозиметра ДКС-АТ-1123. Паспортный диапазон регистрируемого непрерывного рентгеновского и гамма излучения от 15 кэВ до 3 МэВ. Методика измерения не описана подробно.

6. Не приведена оценка стабильности вакуумных условий при долговременной работе массивных графитовых катодов. Между тем, этот вопрос имеет важное значение при сравнении с эксплуатационными характеристиками отпаянных рентгеновских трубок. Необходимость использования вакуумной системы существенно ограничит диапазон возможных применений разработки.

Указанные недостатки не являются принципиальными и не умаляют научной ценности работы в целом.

Диссертация Чепусова А.С. является научно-квалификационной работой, в которой представлены исследования автоэмиссионных свойств углеродных катодов в техническом вакууме, а также разработка рентгеновского источника на базе таких материалов.

Диссертационная работа обладает научной новизной и практической ценностью, вполне удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ.

Автор диссертации, Чепусов Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Я, Егоров Иван Сергеевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Чепусова Александра Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Егоров И.С.

кандидат технических наук, специальность ВАК 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника», научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (tpu.ru)

Подпись Егорова И.С. удостоверено
Ученый секретарь Ученого совета ИФНУ



Ананьева О.А.

Егоров Иван Сергеевич
г. Томск, проспект Ленина, д. 30
e-mail: egoris@tpu.ru Тел.: 7 (3822) 60-64-05