

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д004.024.01 НА БАЗЕ  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 12.09.2018 г. №3

О присуждении Чепусову Александру Сергеевичу ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Свойства автоэмиссионных катодов из углеродных материалов в условиях технического вакуума» по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» принята к защите 12.07.2018 г. (протокол № 2) диссертационным советом Д004.024.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, сайт: [www.iер.uran.ru](http://www.iер.uran.ru), утвержденного приказом Рособнадзора № 1246-дс от 18.07.2008 г.

Соискатель Чепусов Александр Сергеевич, 1988 года рождения, в 2011 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; обучался в аспирантуре при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» с 2011 по 2014г.; работает младшим научным сотрудником в лаборатории импульсных источников излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории импульсных источников излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук и на кафедре электрофизики Физико-технологического института Федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Чолах Сеиф Османович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Физико-технологический институт, кафедра электрофизики, профессор.

Научный консультант – кандидат технических наук, Корженевский Сергей Романович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория импульсных источников излучения, старший научный сотрудник, ответственный за лабораторию.

Официальные оппоненты:

Березин Владимир Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск), кафедра «Физическая электроника» института естественных и точных наук;

Егоров Иван Сергеевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск), научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий»;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск), в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук Батраковым Александром Владимировичем, заведующим лабораторией вакуумной электроники, указала, что диссертация Чепусова А.С. является научно-квалификационной работой,

обладающей научной новизной и практической ценностью. Ее результаты могут быть использованы на предприятиях электронной промышленности, таких как ПАО «Светлана» - АО «Светлана-Рентген», ООО «Импульсные технологии», ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор» и др. Отдельные предлагаемые в диссертации разработки могут представлять интерес для ряда академических институтов. Диссертационная работа Чепусова А.С. удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чепусов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

Соискатель имеет 24 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 12 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 6. В научных журналах, рекомендованных ВАК, опубликовано 5 работ. Опубликовано 6 работ в сборниках трудов конференций. Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. В работе продемонстрировано использование блока ввода-вывода RL-88АС для автоматизации проведения экспериментов. На базе устройства построена установка для исследования автоэмиссионных свойств материалов (Автоматизация эксперимента с помощью устройств ввода-вывода RL-88АС / В.А. Бессонова, В.Л. Кузнецов, Д.С. Скоморохов, А.С. Чепусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, №1. – С. 48-54).

2. В работе путем анализа образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показано формирование алмазоподобных кластеров на поверхности графитовых автоэмиссионных катодов в процессе их эксплуатации (Исследование поверхности автоэмиссионных катодов из искусственных углеродных материалов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Е.А. Кислов, А.А. Комарский, В.Л. Кузнецов, С.П. Никулин, Д.С. Скоморохов, А.С. Чепусов, С.О. Чолах // Журнал прикладной спектроскопии. – 2013. – Т. 80, №2. – С. 216-220).

3. В работе исследуется влияние ионной бомбардировки на автоэмиссионные характеристики катодов из углеродных материалов (Chepusov, A.S. The influence of ion bombardment on emission properties of carbon materials / A.S. Chepusov, A.A. Komarskiy, V.L. Kuznetsov // Applied surface science. – 2014. – V. 306. – P. 94-97).

4. В работе показано применение массивных графитов в качестве катодов импульсных и рентгеновских трубок постоянного напряжения (Application of carbon materials for creation of X-ray sources cathodes / A. Chepusov, A. Komarskiy, S. Korzhenevskiy, V. Bessonova // Materials Today: Proceedings. – 2016. – V. 3, S. 2. – P. 246-251).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

– от ведущей организации; имеются следующие замечания:

1) При интерпретации экспериментальных данных в работе предполагается, что эмиссия электронов из исследуемых катодов имеет исключительно автоэмиссионный характер. Мы полагаем, что в условиях выполненных экспериментов нельзя исключать наличие микрозарядов, и это может повлиять на правильность интерпретации характера изменения поверхности катодов в процессе их длительной эксплуатации. К сожалению, в работе не представлены данные, опровергающие или подтверждающие отсутствие микрозарядов при регистрации долговременных характеристик катодов, а интерпретация результатов выполнена без учета такой возможности.

2) В работе зарегистрированы высокие значения фактора  $\beta$  уравнения Фаулера-Нордгейма. Такие значения  $\beta$  выходят за пределы теории Фаулера-Нордгейма. В настоящее время в литературе известны теоретические модели, объясняющие такие значения, но в работе это не отражено. Учет этих моделей был бы полезен для анализа полученных экспериментальных данных.

– В отзыве на диссертацию официального оппонента д.ф.-м.н. В.М. Березина имеются следующие замечания:

1. Экспериментальные ВАХ в диссертации приведены в абсолютных значениях тока эмиссии. В то время как для удобства их восприятия и сравнения с теорией удобнее использовать плотность автоэмиссионного тока.

2. В процессе анализа РФЭС рабочей и нерабочей поверхностей катодов, автор использовал известные данные о спектрах равновесного графита и алмаза. Между тем, после воздействия интенсивных электрических и тепловых полей образцы катодов могут сохранять значительные упругие напряжения и дефекты, влияющие на углеродные связи и спектры графита. Поэтому утверждение об образовании алмазных кластеров нуждается в дополнительных, независимых подтверждениях.

3. Приведенные в работе спектры валентной полосы образца МПГ-7, на мой взгляд, недостаточны для утверждения об изменениях электронной структуры этой полосы.

4. Согласно приведенным в работе экспериментальным данным, характеристики ДВХ не достигают стационарного значения параметров. Хотелось бы знать мнение автора о причинах этого факта.

– В отзыве на диссертацию официального оппонента к.т.н. И.С. Егорова 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. Натекатель присоединен к рабочей камере без буферного объёма, что может

приводить к колебаниям скорости натекания. В работе не описано, как учитывалось влияние паров вакуумного масла и возможные колебания скорости натекания 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 « $\beta$ -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.

– В отзыве на автореферат от ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук д.ф.-м.н. Тиунова В.Ф. имеется следующее замечание:

– Выводы весьма громоздки и большинство из них имеет формальный, описательный характер. Выводы работы должны быть, напротив, лаконичны, содержательны и без излишней детализации фактов.

– В отзыве на автореферат от директора ООО «Импульсные технологии», к.т.н., лауреата премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2016 г. Бочкова В.Д. замечаний нет;

– В отзыве на автореферат от научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук к.ф.-м.н. Колосько А.Г. имеются следующие замечания:

– Не поднят вопрос технологической оптимизации улучшения свойств графитовых катодов за счёт ионной бомбардировки;

– Не поднят вопрос влияния количества алмазных кластеров на поверхности катода на его эмиссионные свойства.

– В отзыве на автореферат от ведущего научного сотрудника Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, д.т.н. Пальчикова Е.И. имеются следующие замечания:

– Описание элементов измерительной ячейки (Рис. 2а), помещенное в тексте автореферата на стр. 12 (второй абзац сверху), на самом деле описывает элементы, находящиеся на рис. 2б.

– Из рис. 4 видно, что за 15 минут приложения напряжения при постоянном токе сопротивление ячейки не приходит к асимптотическому значению и продолжает расти. Тогда открытым остается вопрос – через какие интервалы времени измерялись вольт-амперные характеристики при измерениях, показанных на рис. 5-7.

– В первом абзаце на стр. 22 говорится, что «Максимальная мощность дозы рентгеновского излучения созданной автоэмиссионной рентгеновской трубки составляет 3,9 мЗв/ч. Она достигнута при токе катода 2 мА, токе анода 122 мкА,

напряжении на аноде 12 кВ. (0,4 Р/ч)». Из этих цифр получается, что более 90% тока теряется на экстракторе. То есть лучевая отдача (КПД) такой конструкции очень мала, экстрактор греется, возможно сам излучает рентгеновское излучение и картинка несколько другая, чем рис. 16. Есть ли пути повышения КПД и лучевой отдачи?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации. У официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Березина В.М. основные работы посвящены исследованию оптических и электрических свойств, а также электронной структуры различных материалов, в том числе углеродных: фуллеренов, нанотрубок, алмазоподобных структур, графеноподобных и углеродных пленок. У официального оппонента, научного сотрудника, кандидата технических наук, Егорова И.С., основные работы посвящены разработке холодных катодов, вакуумной электронике, процессам формирования электронных пучков. Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) является одним из ведущих институтов в области вакуумной электроники и электрофизики.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– Создана экспериментальная установка для исследования автоэмиссионных свойств материалов, позволяющая прогревать образец до 400°C, напускать газовую смесь в рабочий объем, регистрировать вольт-амперные характеристики катодов и исследовать динамику рабочих параметров автоэммиттера в течение длительного времени при стабилизации тока или напряжения на уровне до 2,7 мА и 10 кВ соответственно.

– Изучены автоэмиссионные свойства промышленных графитов марок МГ, МПГ-7, ГМЗ, ГЭ и GS-1800 в условиях технического вакуума, в диапазоне давлений остаточных газов от  $2,3 \cdot 10^{-4}$  Па до  $1,8 \cdot 10^{-2}$  Па.



– Установлено, что в процессе эксплуатации углеродного автокатода происходит изменение его состояния, что выражается в сдвиге вольт-амперных характеристик после длительной работы, уменьшении на 20% коэффициента усиления поля катода и связано с влиянием ионной бомбардировки, сопровождающей процесс автоэмиссии.

– Показано, что углеродные автоэмиссионные катоды в условиях ионной бомбардировки способны работать в режиме самовосстановления, заключающемся в периодическом скачкообразном изменении состояния катода: резком уменьшении рабочего напряжения и увеличении эмиссионного тока.

– Установлено, что наилучшие показатели: напряженность поля старта эмиссии (5 кВ/мм), стабильность работы в течение длительного времени, сопротивление измерительной ячейки – демонстрирует катод из малозольного графита ГМЗ, ему несколько уступают эмиттеры из МГ и МПГ-7, а образцы из ГЭ и GS-1800 характеризуются высокими рабочими напряжениями.

– Показано, что при регистрации вольт-амперных характеристик с ростом напряженности электрического поля происходит вовлечение в процесс эмиссии новых участков поверхности катода, при этом интегральный ток растет за счет увеличения эмиссионной площади, а не плотности тока, которая стабилизируется на уровне порядка 0,01-0,02 А/см<sup>2</sup>.

– Установлено, что в процессе работы автоэмиссионных катодов из искусственных углеродных материалов на поверхности графита формируются алмазоподобные кластеры, о чем свидетельствует перестройка электронной структуры приповерхностного слоя от sp<sup>2</sup>-гибридизации к sp<sup>3</sup>-типу.

– Разработана рентгеновская трубка с массивным автоэмиссионным катодом из графита. Трубка генерирует излучение с энергией до 12 кэВ; размер фокусного пятна составляет 1,8 мм. Рентгеновская трубка может эксплуатироваться в условиях технического вакуума, а также сохраняет работоспособность при повышенном давлении остаточных газов.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

– применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих методов: получение вольт-амперных характеристик и

изучение динамики рабочих характеристик во времени – в сочетании с широким диапазоном условий исследований;

– изложены факторы, влияющие на рост интегрального эмиссионного тока при регистрации вольт-амперных характеристик для катода, выполненного из конструкционных графитов: нарастание тока обеспечивается увеличением количества эмиссионных центров, а не повышением плотности тока;

– раскрыто влияние процессов, сопровождающих автоэмиссию, на реструктуризацию поверхности углеродного катода, что приводит к трансформации  $sp^2$ -связей атомов в  $sp^3$ , изменению автоэмиссионных свойств образцов и их работе в режиме самовосстановления;

– изучена работа массивных углеродных автокатодов в рентгеновской трубке, которая способна функционировать в техническом вакууме вплоть до уровня  $10^{-2}$  Па и сохранять работоспособность даже после зажигания тлеющего разряда между электродами

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

– Создана экспериментальная установка для исследования автоэмиссионных свойств различных материалов, которая позволяет проводить прогрев образцов в вакууме до  $400^{\circ}\text{C}$ , напускать в объем газовую смесь, регулировать стабилизированные ток или напряжение в диапазоне 0-2,7 мА и 0-10 кВ соответственно.

– Достигнута работа массивного автоэмиссионного катода из графита в диапазоне токов 0,2 – 1 мА при давлении  $10^{-4}$  Па со стабильностью значений порядка 5-10%.

– Разработана рентгеновская трубка с автоэмиссионным катодом из конструкционного графита с размером фокусного пятна 1,8 мм, генерирующая при этом мощность дозы до 4 мЗв/ч при напряжении на аноде 12 кВ, анодном токе 122 мкА, давлении  $10^{-4}$  Па, с измеренным ресурсом 120 часов.

### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- для экспериментальных работ применены современные независимые физические методы исследования на сертифицированном оборудовании, многократно воспроизведены результаты, касающиеся изменений структуры и свойств катодов из графитов, обеспечивается согласие результатов и выводов с физическими моделями;
- использовано сравнение авторских данных и результатов, полученных ранее по рассматриваемой тематике: проведен сравнительный анализ спектральных особенностей изучаемых образцов, изменения их эмиссионных свойств в атмосфере газов с материалами, представленными в литературе;
- использованы современные (дополняющие друг друга) методы анализа структуры и свойств материалов, методики сбора и обработки информации, а также численные методы обработки экспериментальных данных с применением специальных общепринятых программ.

### **Личный вклад соискателя заключается в:**

участии в создании и модернизации исследовательской установки; проведении экспериментов по исследованию автоэмиссионных характеристик катодов из искусственных углеродных материалов в различных условиях эксплуатации; разработке и изготовлении конструкции рентгеновской трубки с автоэмиссионным катодом, исследовании ее параметров, измерении характеристик; обработке и анализе результатов РФЭС-исследования поверхности углеродных катодов; обсуждении полученных результатов; подготовке материалов для научных конференций и написании научных статей.

Диссертационная работа Чепусова А.С. содержит новые научные результаты по автоэмиссии из массивных искусственных углеродных материалов и новую конструкционную разработку рентгеновской трубки, что имеет несомненное значение как для электрофизики, так и для создания прикладных электрофизических установок. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 12.09.2018 г. диссертационный совет Д004.024.01 принял решение присудить Чепусову Александру Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета



Шпак Валерий Григорьевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Медведев Михаил Владимирович

Дата оформления Заключения

12.09.2018 г.