

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 19.12.2017г. № 3

О присуждении Комарскому Александру Александровичу ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Острофокусная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными электродами» по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» принята к защите 27.09.2017г. 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 Комарский Александр Александрович, 1988 года рождения, в 2012 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 2012 по 2016г.; 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 физ.-мат. 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, исполняющий обязанности заведующего лабораторией.

Официальные оппоненты:

Пальчиков Е. И., доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (г.Новосибирск), ведущий научный сотрудник;

Шиканов А.Е., доктор технических наук, лауреат госпремии УССР, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва), профессор кафедры "Электрофизические установки", главный научный сотрудник Радиационного ускорительного центра;

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 доктором физико-математических наук Ростовым Владиславом Владимировичем, заведующим отделом физической электроники указала, что диссертация Комарского А.А. является научно-квалификационной работой, обладающим научной новизной и практической ценностью. Результаты работы могут быть

использованы на предприятиях электронной промышленности, таких как НПО «Светлана», ООО «Спектрофлеш», ОАО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма» и др. Отдельные предлагаемые в диссертации наработки могут представлять интерес для ряда академических институтов. Диссертационная работа Комарского А.А. удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Комарский Александр Александрович заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 17 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 7. В научных журналах, рекомендованных ВАК, опубликовано 7 работ. Опубликовано 7 работ в сборниках трудов конференций, получено 3 патента на полезную модель. Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. В работе исследуется влияние ионной бомбардировки на автоэмиссионные характеристики катодов из графитов. (The influence of ion bombardment on emission properties of carbon materials / A. Chepusov, A. Komarskiy, V. Kuznetsov // Applied Surface Science. – 2014. – V. 306. – P. 94–97. Объем работы 0,3 печ. л., из них вклад соискателя – 0,15 печ.л.)

2. В работе рассмотрены вопросы применения компактных импульсных рентгеновских аппаратов в медицинской диагностике, приводятся экспериментальные данные по снижению дозы облучения пациентов на импульсных аппаратах в отличие от аппаратов непрерывного действия. (Применение импульсных частотных наносекундных рентгеновских аппаратов для диагностики / С. Н. Баянкин, И. Э. Можарова, В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2015. – №2. – С. 42-46. Объем работы 0,3 печ. л., из них вклад соискателя – 0,2 печ. л.)

3. В работе показан принцип регулировки выходного напряжения генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и твердотельным прерывателем тока SOS. (Регулировка выходного напряжения импульсного высоковольтного наносекундного генератора с индуктивным

накопителем энергии и твердотельной системой коммутации / Корженевский С.Р., Комарский А.А., Чепусов А.С., Бессонова В.А., Титов В.Н. // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – №1. – С. 52 – 55. Объем работы 0,3 печ. л., из них вклад соискателя – 0,15 печ. л.)

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

– от ведущей организации; имеются следующие замечания:

1) Полученные диссертантом данные по Оже-спектрометрии состояния графитовых эмиттеров после их испытаний в квазистатическом режиме АЭЭ имеют самостоятельную ценность. Однако переносить вывод о гибридизации атомных связей за счёт ионной бомбардировки на случай взрывной эмиссии электронов в режиме наносекундных импульсов представляется не убедительным и, пожалуй, даже некорректным. Действительно, если в первом случае осуществлялся специальный напуск газа Ar, и наблюдаемые характеристики автоэмиссии смещались с изменением давления остаточного газа при достаточном времени работы эмиттера, то для второго случая условия для наработки и транспорта ионов к катоду качественно другие. При длительности тока порядка 5 нс роль бомбардировки катода ионами должна быть исчезающей малой, а на смену ей должны приходиться процессы, связанные с быстрым или сверхбыстрым электрическим взрывом отдельных субмикронных фрагментов на поверхности (Орешкин В. И. и др., ЖТФ, 2007). При таком сценарии, когда за время ввода энергии порядка  $10^{-9}$  с вещество не успевает преодолеть силы инерции, в результате высокого локального давления и температуры возможно формирование из частиц графита с кристаллической структурой аморфных и алмазоподобных частиц (Korovin S. D., Litvinov E. A., Mesyats G. A. et al, IEEE Trans. Plasma Sci., 2006).

2) Автор оперирует со спектром тормозного рентгеновского излучения, применяя чрезмерно упрощённую модель из справочника по рентгенотехнике 1992 г., которая как-то может отражать суть лишь для фиксированной энергии электронов. Из осциллограмм на самом деле можно сделать вывод о том, что пиковое значение ускоряющего напряжения не обязательно совпадает по времени с пиковым значением тока электронов. Неудовлетворённость вызывает также

последующий на основании пересчёта спектра с ростом пиковых напряжений вывод, что с ростом интенсивности «излучение становится более однородным».

3) Замечание по главе 3. На стр. 74 диссертации говорится об оценках ресурса работы разработанной рентгеновской трубки на основе измерения мощности дозы излучения. Однако в данной главе не найдено, чтобы использовался какой-либо детектор рентгеновского излучения. Со ссылкой на осциллограммы напряжения и тока, тем не менее, указывается, что после 2 млн. импульсов «...мощность дозы снизилась на 2% от первоначального значения». Такой результат представляется сомнительным и вызывает вопрос о том, каков же тогда разброс пиковых мощностей от импульса к импульсу или хотя бы девиация доз за импульс. Нельзя также согласиться с интерполяцией эрозии анода после наработки  $2 \cdot 10^6$  на ресурс  $10^7$  импульсов, когда доза излучения может снизиться «примерно на 20-25%». Возможно, с такой оценкой можно было бы согласиться, если бы было доказано, что при таком ресурсе отсутствует деградация эмиссионных свойств графитодиэлектрического катода; но автор предполагает, что такой деградации нет.

– В отзыве на диссертацию официального оппонента д.т.н. Е.И. Пальчикова имеются следующие замечания:

1. Автором недостаточно проработан обзор литературы. Следовало упомянуть, что первоначальными авторами конструкций большинства из упомянутых в главе 1 промышленно выпускаемых импульсных рентгеновских трубок являются Александрович Э.-Г.В., Белкин Н.В., Канунов М.А., Разин А.А. (ВНИИЭФ, г. Саров) и сотрудники ОКБ РП (ныне «Светлана-рентген», г. Санкт-Петербург) Н.А. Дронь, Г.Н. Слоева. См. например Э.-Г.В. Александрович, Н.В. Белкин, Н.А. Дронь, Г.Н. Слоева. Малогабаритная импульсная рентгеновская трубка. // ПТЭ, 1974 N 5 с.189-190. Малогабаритная импульсная рентгеновская трубка с самовосстанавливающимся автокатодом / Александрович Э.Г.-В. Белкин Н.В., Канунов М.А., Разин А.А. // ПТЭ. 1972. № 6. С. 198–199.

2. Оформление. Подписи на рис 1.3, 1.7 не читаются. Мелкий шрифт, размыто изображение. На стр. 61 опечатка в значении теплопроводности для

графита. В некоторых местах не указаны дистанции от фокуса до точки измерения дозы и мощности дозы, что затрудняет сравнение данных.

3. Автором применялись дозиметры ДКС-АТ 1123 (сцинтиллятор + ФЭУ) и Unfors Xi (полупроводниковый диодный) имеющие, согласно паспортам, максимально регистрируемую мощность дозы не более 10 Зв/ч и 1 Гр/с соответственно. Адекватная сертификация Росреестром «для наносекундных импульсов» без указания мощности дозы в одном импульсе и максимальной дозы в одном импульсе (см. стр. 50, стр. 70) вызывает сомнения. Мощность дозы одиночного импульса в созданном аппарате согласно рис. 4.8 и 4.9 составляет порядка 500 Р/с. Поэтому сравнения доз при съемке медицинских объектов непрерывными и импульсными источниками (стр. 91) требует дополнительной проверки.

– В отзыве на диссертацию официального оппонента д.т.н. А.Е. Шиканова имеются следующие замечания:

1. Не достаточно корректно проводится сопоставление одних и тех же материалов для катодов со стабильной и импульсной эмиссией, в силу различия их механизмов.

2. Спектры тормозного рентгеновского излучения получены с использованием формул Шиффа, которые не работают применительно к генерации рентгеновских квантов в импульсном режиме.

3. Используемый в диссертации термин «взрывоэмиссионная трубка» нельзя признать удачным.

4. В тексте диссертации встречаются отдельные грамматические ошибки и опечатки.

– 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. Тиунов В.Ф. замечаний нет;

– 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 научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», к.т.н. Егоров И.С. имеются следующие замечания:

– При описании расчетной формулы интенсивности рентгеновского излучения (1) автор указывает некий «коэффициент пропорциональности», диапазон значений которого для применяемых материалов не оговаривается. Более подробное описание выражения (1) даст возможность оценить корректность сравнения интенсивности рентгеновского излучения для применяемых материалов (формула 2).

– При экспериментальном исследовании ресурса работы трубки в повторно-кратковременном режиме за  $2 \cdot 10^6$  импульсов мощность дозы снизилась на 2% от первоначального значения. На этом основании сделан вывод о том, что «трубка отработает  $10^7$  импульсов и доза излучения снизится примерно на 20-25%». Деграция эмитирующей поверхности взрывоэмиссионного катода – сложный комплексный процесс, влияющий, в том числе, и на условия формирования импульсов ускоряющего напряжения. Сделанный вывод с экстраполяцией результатов в сторону увеличения ресурса требует экспериментального подтверждения.

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 ведущего научного сотрудника, доктора технических наук, доцента Пальчикова Е. И. основные работы посвящены разработке импульсных рентгеновских источников и исследованиям быстропротекающих процессов. У официального оппонента главного научного сотрудника, доктора технических наук, профессора, Шиканова А.Е., основные работы посвящены разработке наносекундных

компактных ускорителей, вакуумной электронике. Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) является одним из ведущих институтов в области сильноточной электроники и электрофизики.

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

– Установлено, что в процессе работы конструкционных высокопрочных графитов в качестве холодных катодов при давлении в вакуумной камере  $10^{-7}$  –  $10^{-6}$  торр происходит смена типа связей между поверхностными атомами углерода за счет ионной бомбардировки ионами остаточных газов, что приводит к росту эмиссионного тока.

– Создан взрывоэмиссионный графитокерамический катодный узел для импульсной высокочастотной рентгеновской трубки, позволяющий получать стабильную эмиссию электронов при снижении скорости нарастания напряжения на трубке до  $2,5 \cdot 10^{12}$  В/с, тогда как катод в серийно выпускаемых рентгеновских трубках РИА-1 стабильно работает при скорости нарастания напряжения не менее  $10^{13}$  В/с.

– Установлено, что при прочих равных условиях для рентгеновской трубки с графитокерамическим катодным узлом спектр рентгеновского излучения смещен в область большей энергии по сравнению с трубками, в которых используется гребенчатый металлодиэлектрический катод.

– Разработан комбинированный вольфрамографитовый анод для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки со средней мощностью, рассеиваемой на аноде, до 3 кВт при работе в повторно-кратковременном режиме.

– Показано, что размер эффективного фокусного пятна рентгеновской трубки с толщиной общего фильтра 2 мм алюминия и более, при использовании комбинированного вольфрамографитового анода, в диапазоне напряжений 70 – 120 кВ не зависит от размера области графитового радиатора, бомбардируемой электронным пучком, а определяется только диаметром вставки, изготовленной из вольфрама.



– Разработана импульсная частотная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с частотой следования импульсов до 5 кГц и со средней выходной мощностью, рассеиваемой на аноде, до 3 кВт при работе в повторно-кратковременном режиме в течение  $2 \cdot 10^6$  импульсов.

– Показано, что разработанная острофокусная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными электродами обеспечивает регулировку напряжения включения трубки в диапазоне от 70 до 120 кВ при импульсном токе до 300 А, средней выходной мощности до 3 кВт.

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

– графитокерамический катод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки позволяет получить стабильную эмиссию электронов при снижении скорости нарастания напряжения на трубке с  $10 \cdot 10^{12}$  В/с до  $2,5 \cdot 10^{12}$  В/с.

– рост эмиссионного тока катода, выполненного из конструкционных графитов, наблюдается вследствие смены типа гибридизации с  $sp^2$  на  $sp^3$ , вызванной бомбардировкой поверхности катода ионами остаточных газов в процессе работы.

– комбинированный вольфрамографитовый анод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки позволяет при эффективном диаметре фокусного пятна 1,5 мм иметь среднюю мощность рассеяния 3 кВт.

– острофокусная импульсная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными графитокерамическим катодом и вольфрамографитовым анодом имеет допустимую частоту следования импульсов до 5 кГц и ресурсом стабильной работы не менее  $2 \cdot 10^6$  импульсов.

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

– разработана острофокусная импульсная рентгеновская трубка с комбинированными графитокерамическим катодом и вольфрамографитовым анодом с допустимой средней мощностью рассеяния 3 кВт, частотой следования импульсов до 5 кГц и ресурсом стабильной работы не менее  $2 \cdot 10^6$  импульсов.

– создана рентгеновская трубка, в которой обеспечивается стабильная эмиссия электронов в широком диапазоне скорости нарастания воздействующего

напряжения, это позволило разработать импульсные рентгеновские аппараты с регулируемым напряжением включения трубки от 70 до 120 кВ, импульсным током до 300 А, средней выходной мощностью рассеяния до 3 кВт.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

– для экспериментальных работ то, что достоверность обеспечивается согласием результатов и выводов с физическими моделями, использованием современных независимых физических методов исследования на сертифицированном оборудовании, а также многократным воспроизведением результатов, касающихся изменений структуры и свойств катодов из графитов;

– получено хорошее согласие экспериментальных значений допустимой тепловой нагрузки на аноды взрывоэмиссионных рентгеновских трубок с приведенными расчетными моделями;

– использованы современные (дополняющие друг друга) методы анализа структуры и свойств материалов, а также численные методы обработки экспериментальных данных с применением специальных общепринятых программ; в ходе экспериментов производилась регистрация с использованием современного научно-технического оборудования.

**Личный вклад соискателя заключается в:**

проведении экспериментов по исследованию автоэмиссионных характеристик катодов из искусственных углеродных материалов; исследовании изменения электронной структуры методом оже-электронной спектроскопии, изготовлении опытных образцов катодного узла и комбинированного вольфрамографитового анода, исследовании их параметров, проведении оптимизации; разработке конструкции взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с комбинированными электродами из конструкционных графитов; обсуждении полученных результатов; подготовке материалов для научных конференций и написании научных статей.

Диссертационная работа Комарского А.А. содержит новые научные результаты и новую конструкционную разработку взрывоэмиссионной 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 19.12.2017г. Диссертационный совет Д004.024.01 принял решение присудить Комарскому Александру Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 21, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета



Шпак Валерий Григорьевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Медведев Михаил Владимирович

Дата оформления Заключения

19.12.2017г.