

На правах рукописи



Комарский Александр Александрович

Острофокусная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка
с комбинированными электродами.

Специальность: 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук, Федеральном государственном
автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральском федеральном
университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Чолах С. О.

Научный консультант: кандидат технических наук,
Корженевский С. Р.

Официальные оппоненты: **Пальчиков Е. И.**
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «12» декабря 2017 г. в 15 час.00 мин. на заседании диссертационного
совета Д 004.024.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук по
адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, ИЭФ УрО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук и на сайте <http://www.iep.uran.ru/diss/zased/>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Медведев М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Во второй половине 1990-х годов в ИЭФ УрО РАН разработан новый класс рентгеновских аппаратов – импульсные рентгеновские аппараты с индуктивным накопителем энергии и твердотельной системой коммутации [1, 2]. Непосредственно генерация рентгеновского излучения осуществляется с помощью специально созданных для данных аппаратов отпаянных импульсных рентгеновских трубок с металлодиэлектрическим катодом типа РИА-1 [3]. Данные трубки характеризуются средней выходной мощностью рассеивания до 1,6 кВт при работе в повторно-кратковременном режиме с частотой следования импульсов до 4 кГц и стабильной эмиссией электронов при скоростях нарастания импульса напряжения более 10^{13} В/с и амплитуде импульса напряжения от 80 кВ и выше.

Эксплуатация трубок серии РИА-1 при мощности рассеивания выше 1,6 кВт не возможна из-за особенностей конструкции электродного узла. В то же время, все более широкое внедрение цифровых приемников рентгеновского излучения, характеризующихся ограниченным временем накопления доз, часто не превышающем единицы секунд, требует повышения средней выходной мощности генераторов рентгеновского излучения при сохранении диаметра фокусного пятна менее 2 мм. При этом необходимо сохранять частоту следования импульсов излучения на уровне сотен Герц для возможности работы системы в видеорежиме. Кроме того, при напряжении менее 80 кВ наблюдается разброс дозы излучения на уровне 20%, что затрудняет проведение дефектоскопии промышленных изделий из легких сплавов и композитов, например, в области авиационной техники. Такая нестабильность генерации излучения возникает из того, что при сохранением длительности импульса на уровне 20-50 нс происходит снижение скорости нарастания напряжения до значения менее 10^{13} В/с, что ниже порога стабильной эмиссии электронов металлодиэлектрическим катодом трубок

серии РИА-1. Кроме этого, широкому внедрению импульсных рентгеновских аппаратов в промышленную дефектоскопию, медицинскую диагностику, в сравнении с аппаратами постоянного тока, препятствует отсутствие возможности оперативной регулировки выходного напряжения и как следствие эффективной энергии рентгеновского излучения.

Таким образом, разработка импульсной рентгеновской трубки для мощных компактных высокочастотных наносекундных высоковольтных генераторов с индуктивным накопителем энергии и полностью твердотельной системой коммутации для промышленного и медицинского использования совместно с цифровыми приемниками излучения, работающей в широком диапазоне ускоряющего напряжения является **актуальной задачей**.

Цель работы и задачи диссертационной работы.

Цель работы заключается в проведении исследований по разработке взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с рассеиваемой мощностью на аноде до 3 кВт, эффективным размером фокусного пятна не более 2 мм и с катодным узлом, обеспечивающим стабильную электронную эмиссию при скоростях нарастания напряжения менее 10^{13} В/с, частоте следования импульсов до 5 кГц, ресурсом стабильной работы не менее $2 \cdot 10^6$ импульсов.

Научная новизна.

1. Создан графитокерамический катод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки, позволяющий 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.

2. Показано, что 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.

3. Разработан комбинированный вольфрамографитовый анод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с эффективным размером фокусного пятна 1,5 мм и средней мощностью рассеяния 3 кВт.

4. Создана острофокусная импульсная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными графитокерамическим катодом и вольфрамографитовым анодом с допустимой частотой следования импульсов до 5 кГц и ресурсом стабильной работы не менее $2 \cdot 10^6$ импульсов.

Практическая ценность работы.

1. В результате проведенных исследований 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.

2. В созданной рентгеновской трубке обеспечивается стабильная эмиссия электронов в широком диапазоне скорости нарастания воздействующего напряжения, что позволяет создавать 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.

Основные положения выносимые на защиту.

1. Графитокерамический взрывоэмиссионный катод на основе конструкционного мелкозернистого графита в наносекундных рентгеновских трубках обеспечивает взрывную эмиссию электронов при снижении скорости нарастания напряжения на трубке с $10 \cdot 10^{12}$ В/с до $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с при нестабильности рентгеновского излучения от импульса к импульсу менее 10%.

2. Воздействие наносекундного электронного пучка с энергией электронов до 120 кэВ и средней мощностью 3 кВт на комбинированный вольфрамографитовый анод

рентгеновской трубки не вызывает снижения дозовых характеристик излучения при диаметре эффективного фокусного пятна 1,5 мм в течение $2 \cdot 10^6$ импульсов.

3. Электродный узел на основе комбинированных графитокерамического катода и воольфрамографитового анода острофокусной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки обеспечивает устойчивую генерацию рентгеновского излучения при изменении ускоряющего напряжения в диапазоне от 70 до 120 кВ при импульсном токе до 300 А, средней выходной мощности до 3 кВт.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается применением современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, надежной статистической выборкой. Полученные данные согласуются с имеющимися в литературе, не противоречат физическим законам и принципам.

Основные результаты обсуждались на следующих российских и международных конференциях: II Всероссийской конференции производителей рентгеновской техники (С-Петербург, 2015 г.); на международной конференции Spring World Congress on Engineering and Technology SCET 2014 (Китай, Шанхай, 2014 г.); 18-й и 21-й Всероссийских научных конференциях студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-18 и ВНКСФ-21 (Красноярск, 2012 г.; Омск, 2015 г.); на XI, XIII, XV, XVII всероссийских молодежных школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2010 г., 2012 г., 2014 г., 2016 г.).

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах, 7 тезисов докладов всероссийских и международных конференций, также получено 3 патента на полезную модель.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментов, а также обсуждении полученных результатов. Лично диссертант проводил эксперименты по исследованию автоэмиссионных характеристик катодов из искусственных углеродных материалов, а также исследования изменения

электронной структуры методом оже-электронной спектроскопии. Автором изготовлены опытные образцы катодного узла и комбинированного вольфрамографитового анода, исследованы их параметры, проведена оптимизация. Диссертант разработал конструкцию взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с комбинированными электродами из конструкционных графитов.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа изложена на 107 страницах, содержит 82 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает 114 наименований на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, отмечается научная новизна работы, описана структура диссертации.

В **первой главе** описано современное состояние развития импульсных рентгеновских источников, приведены схемы имеющихся типов генераторов высоковольтных импульсов, а также конструкции взрывоэмиссионных рентгеновских трубок (РТ).

Анализ работ, посвященных разработке рентгеновских источников с холодными катодами из различных форм графита, показал, что в основном исследователи занимаются разработкой автоэмиссионных рентгеновских трубок, в частности, с холодными катодами из наноструктурных форм углерода. Однако, автоэмиссионные рентгеновские трубки имеют малую мощность, работают в условиях высокого вакуума для уменьшения деградации вследствие ионной бомбардировки, недолговечны и имеют ограниченную область применения.

В отличие от автоэмиссии взрывная эмиссия из углеродных материалов изучена крайне слабо. В существующих исследованиях рабочие поверхности катодов изготовлены из наноразмерных углеродных материалов. Работ, связанных с использованием конструкционных высокопрочных графитов в качестве электродов для взрывоэмиссионных рентгеновских трубок, не проводилось. Интересным для изучения является взрывная эмиссия с конструкционных марок графита для разработки на их основе катодов для импульсных рентгеновских трубок.

Рентгеновские генераторы с емкостными накопителями энергии и разрядниками-обострителями обладают низкой частотой следования импульсов, ограниченной десятками Гц, нестабильностью срабатывания разрядника по напряжению, а также отсутствием возможности оперативно регулировать напряжение включения на трубке. По этим параметрам данные генераторы уступают другому типу генераторов, генераторам с индуктивными накопителями энергии и твердотельными коммутаторами – SOS-диодами. Эти генераторы имеют частоту следования импульсов свыше 100 кГц [4], стабильное выходное напряжение, и позволяют реализовать регулировку напряжения срабатывания рентгеновской трубки путем изменения скорости нарастания импульса высокого напряжения.

В импульсных взрывоэмиссионных рентгеновских трубках на данный момент достигнуты следующие характеристики: средняя мощность рассеивания до 1,6 кВт, число включений свыше 10^6 импульсов, частота следования импульсов до 5 кГц при эффективном фокусном пятне 1,7 мм. В данном типе рентгеновских трубок стабильная эмиссия обеспечивается при скорости нарастания напряжения выше 10^{13} В/с благодаря применению металлодиэлектрического катодного узла. Аноды таких трубок изготавливают из тугоплавкого материала (в основном вольфрам) в виде массивного стержня с коническим заострением с применением радиатора из материала с высокой теплопроводностью (часто медь), расположенного на цилиндрической части анода [5].

Импульсные рентгеновские источники с высоковольтными генераторами с индуктивными накопителями энергии имеют меньшие габариты и массу по сравнению с аппаратами постоянного тока, сравнимы по ресурсу работы и качеству получаемых рентгеновских изображений. Однако, по средней выходной мощности импульсные аппараты уступают аппаратам постоянного тока, что ограничивает их применение в некоторых областях медицинских исследований.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию взрывоэмиссионного графитокерамического катодного узла для импульсной рентгеновской трубки со стабильной работой при скорости нарастания напряжения менее 10^{13} В/с.

Исследована зависимость стабильности работы от давления газа в рабочей камере автоэмиссионных катодов из конструкционных графитов следующих марок: мелкозернистый прочный графит (МПГ-7), мелкозернистый графит (МГ), графит электродный (ГЭ), графит, полученный изостатическим прессованием (GS-1800), графит малозольный (ГМЗ). Данные типы графитов по физическим свойствам схожи с материалом МПГ-6, который является перспективным автоэмиссионным катодом [6]. Изучение автоэмиссионных характеристик обусловлено той причиной, что именно автоэмиссионный ток большой плотности инициирует взрывную электронную эмиссию в импульсных рентгеновских трубках. Основными критериями для выбора материала катодов являются, во-первых, устойчивость к ионной бомбардировке, поскольку ионная бомбардировка является одним из основных факторов, влияющих на изменение состояния поверхности эмиттера, во-вторых, стабильность тока автоэмиссии. По данным параметрам для испытаний при экстремальных нагрузках в качестве взрывоэмиссионного катода наиболее подходящим материалом является МПГ-7. Как показали эксперименты, на поверхности графита МПГ-7 происходит интенсивная генерация новых эмиссионных центров за счет ионной бомбардировки, наблюдаются минимальные флуктуации

напряжения во время работы при стабильном токе эмиссии, по сравнению с другими образцами.

После изучения автоэмиссионных характеристик катодов были получены и проанализированы оже-спектры поверхности до и после работы образцов в качестве автоэмиттеров. Анализ методом оже-спектроскопии электронной структуры поверхностных атомов образцов из конструкционных марок графита после их работы в качестве автоэмиссионных катодов показал, что происходит смена типа гибридизации с sp^2 на sp^3 , это наиболее выражено для марки графита МПГ-7. Смена типа гибридизации определялась путем сравнения дифференциальных спектров оже-электронов образцов автокатодов до и после 15 минут работы при токе 0,1 мА и давлении 10^{-7} торр. Для образца МПГ-7 после 15 минутной работы более существенно проявились особенности, свойственные материалам с sp^3 гибридизацией: наблюдается расщепление характеристической линии углерода, и ее сдвиг по энергетической шкале на 3 эВ, тогда как для других материалов расщепление линии заметно меньше, и ее смещение происходит на 1 эВ.

В местах с изменением кристаллической решетки образуются области близкие по свойствам к диэлектрикам, вследствие чего в данных местах происходит усиление напряженности электрического поля. Таким образом, снижение напряжения эмиссии при стабильном токе объясняется действием ионной бомбардировки, которая меняет электронную структуру эмиттера.

Таким образом, катод для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки изготовлен из графита МПГ-7.

На рисунке 1 представлена фотография и схема разработанного графитокерамического катодного узла для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки.

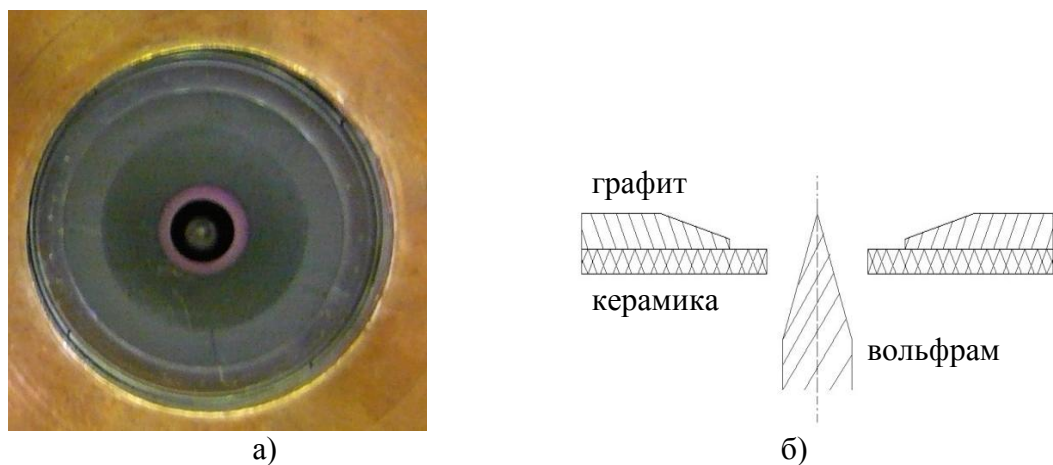


Рисунок 1 – Взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с графитокерамическим катодным узлом: а) фото, б) схематическое изображение.

Данный катодный узел состоит из керамического диска с внутренним отверстием диаметром 3 мм, на котором закреплен диск с внутренним отверстием большего диаметра из конструкционного графита марки МПГ-7, таким образом, создана тройная точка контакта: проводник-диэлектрик-вакуум [7], что ведет к усилению напряженности электрического поля в данном месте.

Для определения стабильности эмиссии графитокерамического катодного узла было проведено исследование его работы при разных скоростях нарастания напряжения.

На рисунке 2 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока при разной скорости нарастания напряжения для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с графитокерамическим катодным узлом. При скорости нарастания напряжения $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с взрывная эмиссия электронов возникала при напряжении около 100 кВ, тогда как при $dU/dt = 1,2 \cdot 10^{13}$ В/с взрывная эмиссия возникала при значении напряжения близком к 150 кВ.

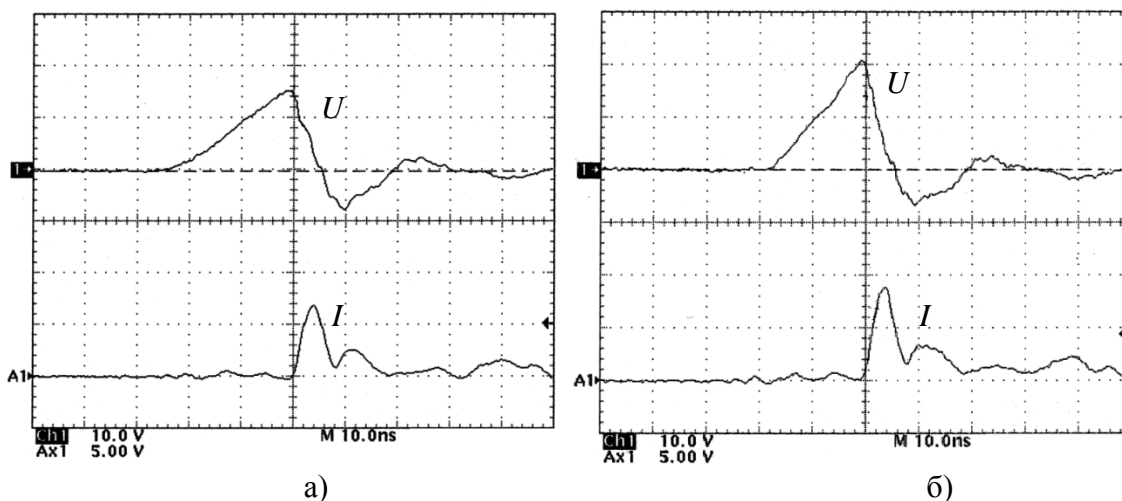


Рисунок 2 – Осциллограммы импульсов напряжения и тока для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с графитокерамическим катодом при разных скоростях нарастания напряжения: а) $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с; б) $dU/dt = 1,2 \cdot 10^{13}$ В/с.

По данным осциллограммам рассчитаны и построены спектры тормозного рентгеновского излучения по длинам волн I_λ , как показано на рисунке 3.

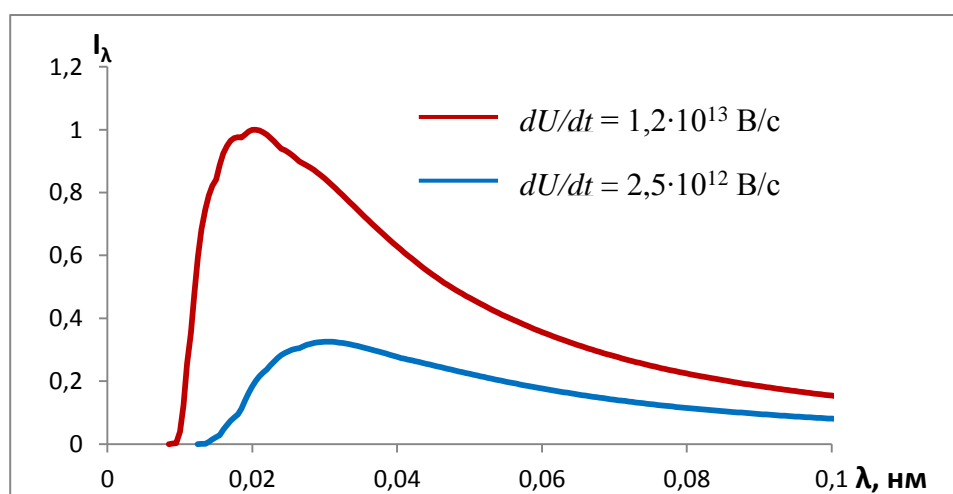


Рисунок 3 – Спектр тормозного рентгеновского излучения для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с графитокерамическим катодом.

Анализ спектральных зависимостей показывает, что происходит смещение как коротковолновой границы, так и максимума спектральной плотности для разных напряжений включения взрывоэмиссионной рентгеновской трубки. Интенсивность спектра смещенного в коротковолновую область выше, и излучение является более однородным. Таким образом, изменяя скорость нарастания напряжения на рентгеновской

трубке можно менять эффективную энергию рентгеновского излучения, что важно при исследованиях объектов с различной плотностью.

Исследована стабильность работы при разных скоростях нарастания импульса напряжения для взрывоэмиссионных катодных узлов 2-х типов: разработанного графитокерамического и катода гребенчатого металлодиэлектрического типа, который применяется в серийно выпускаемых рентгеновских трубках серии РИА1-120. В случае катода, изготовленного с применением конструкционного графита МПГ-7, разброс в значениях мощности доз при скорости нарастания импульса напряжения $2,5 \cdot 10^{12}$ В/с составил менее 10 %, для металлодиэлектрического катода разброс составил около 20%. Стабильная работа с разбросом менее 10% наблюдается для обоих типов катодов при скорости нарастания напряжения более 10^{13} В/с.

В отличие от рентгеновских источников со взрывоэмиссионными металлодиэлектрическими катодными узлами, излучение рентгеновской трубки с графитокерамическим катодным узлом характеризуется меньшей длительностью импульса тока. Благодаря более короткому импульсу тока, рентгеновское излучение более однородно.

В третьей главе представлена разработка вольфрамографитового анода для импульсной наносекундной острофокусной РТ, которая работает в повторно-кратковременном режиме, при напряжении до 120 кВ, частоте следования импульсов до 5 кГц и средней выходной мощности рассеивания в повторно-кратковременном режиме до 3 кВт. Благодаря принципиально новому подходу при разработке анодной части данная трубка превосходит по средней выходной рассеиваемой мощности в повторно-кратковременном режиме ранее созданные импульсные взрывоэмиссионные рентгеновские трубки.

Задача создания анода для импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки способного рассеивать тепловую мощность до нескольких кВт возникла с появлением высоковольтных импульсных генераторов с индуктивными накопителями энергии и полностью твердотельной системой коммутации, основанной на SOS-диодах. Рентгеновские аппараты с таким типом генераторов по частоте следования импульсов и, как следствие, по мощности существенно превосходят аппараты с емкостными накопителями энергии, а их средняя выходная мощность ограничивается, главным образом, допустимой тепловой нагрузкой анода.

Для повышения рассеиваемой тепловой мощности предлагается использовать комбинированный вольфрамографитовый анод, представляющий собой графитовый стержень с находящимся в центре него вольфрамовой вставкой (рис 4).

Искусственные углеродные материалы обладают уникальными свойствами. Они имеют теплопроводящие свойства на уровне меди, а температура плавления соизмерима с температурой плавления вольфрама.

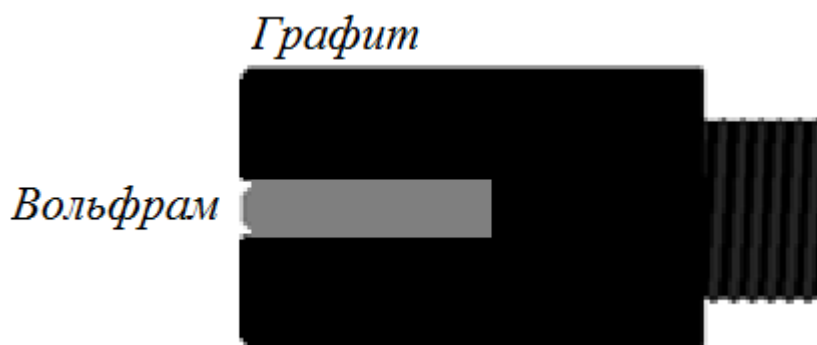


Рисунок 4 – Схематическое изображение вольфрамографитового анода.

Кроме того, известно, что интенсивность рентгеновского излучения определяется, как

$$I_{x-ray} = k \cdot I \cdot Z \cdot U^2 \quad (1)$$

где I_{x-ray} – интенсивность рентгеновского излучения, k – коэффициент пропорциональности, Z – атомный порядковый номер материала анода, I – сила тока

рентгеновской трубки, U – разность потенциалов на рентгеновской трубке. Следовательно, соотношение интенсивностей рентгеновского излучения при прочих равных условиях:

$$\frac{I_{x-ray_W}}{I_{x-ray_{Gr}}} = \frac{Z_W}{Z_{Gr}} = 12.33 \quad (2)$$

где I_{x-ray_W} , $I_{x-ray_{Gr}}$ – интенсивность рентгеновского излучения с поверхности вольфрама и графита соответственно, Z_W и Z_{Gr} – атомный порядковый номер вольфрама и графита соответственно.

Это дает основание предположить, что интенсивность излучения от углерода с поверхности комбинированного вольфрамографитового анода будет настолько мала, что ей можно пренебречь. Следовательно, в трубке предложенной конструкции допустима установка графитового радиатора прямо в области анода, бомбардируемой электронным пучком. Также важно, что эффективное фокусное пятно будет определяться только диаметром вольфрамового стержня. Таким образом, упрощается задача фокусировки электронного пучка, направленная на достижение минимальных размеров фокусного пятна.

На рисунке 5 представлен расчет нагрева фокусного пятна для предложенного вольфрамографитового анода.

Значения допустимой мощности, полученные для вольфрамографитового анода при оценочном расчете, превосходят практически в 2 раза значения допустимой мощности для анода с медным радиатором, который применяется в серийно выпускаемых трубках РИА-1.

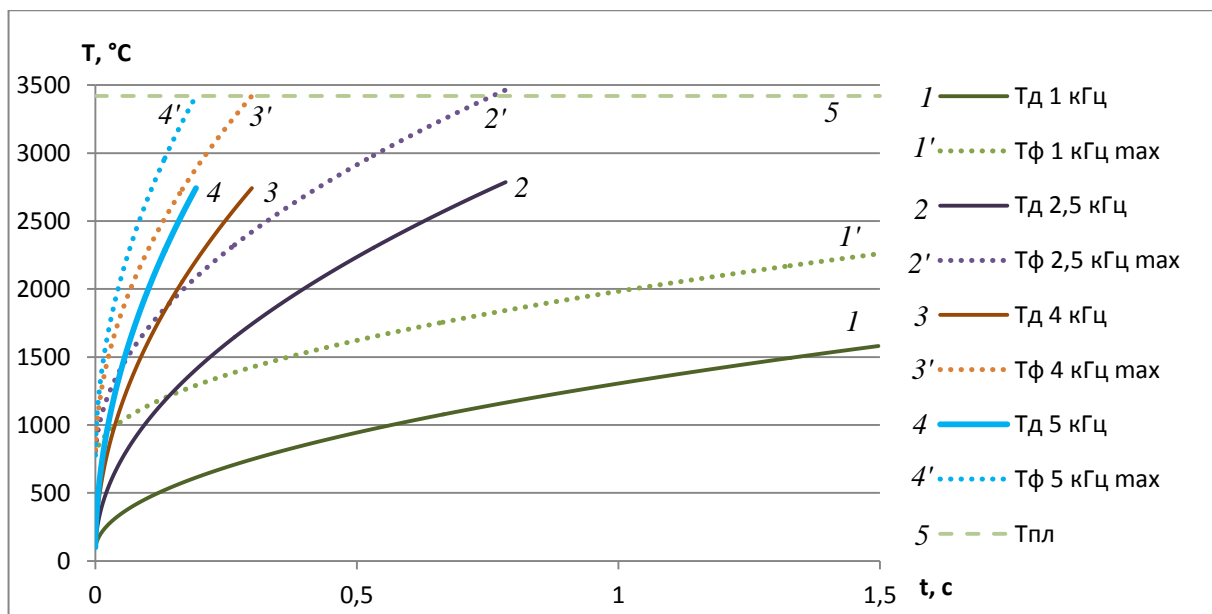


Рисунок 5 – Зависимость температуры фокуса от времени экспозиции для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с вольфрамографитовым анодом. Эффективный диаметр фокусного пятна 1,5 мм, энергия за импульс $\Delta Q = 0,6$ Дж. T_{ϕ} – температура фокусного пятна анода взрывоэмиссионной трубки в момент после импульса, $T_{д}$ – остаточная температура от предшествующих импульсов.

Для подтверждения расчетов изготовлен и исследован образец вольфрамографитового анода для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки. На рисунке 6 показан внешний вид изготовленного анода. В графитовый цилиндр диаметром 10 мм запрессован вольфрамовый пруток диаметром 1,5 мм, так, что торцевые поверхности цилиндра и прутка находятся в одной плоскости с погрешностью не более 0,1 мм.



Рисунок 6 – Вольфрамографитовый анод, макетный образец.

Эксперимент проведен на установке с безмасляной системой откачки при давлении в камере порядка 10^{-7} торр. Генератор высоковольтных импульсов имеет

следующие параметры: амплитуда импульса напряжения $U_a = 140$ кВ, частота следования импульсов до 5 кГц, длительность импульса напряжения на полувысоте 20 нс.

Фокусные пятна получены с помощью камеры-обскуры. Изображения фокусных пятен, представленных на рисунке 7.а и 7.б, получены на цифровой плоскопанельный детектор CARESTREAM DRX-1.

По форме фокусного пятна (рис. 7.б) можно видеть, что наблюдается генерация низкоинтенсивного рентгеновского излучения, пропорционального атомному номеру материала мишени, с прилегающей к вольфрамовому стержню поверхности графита. Обязательным требованием при эксплуатации рентгеновских аппаратов является установка фильтров, отсекающих низкоэнергетичную составляющую излучения. Например, согласно ГОСТ 26140-84 для аппаратов напряжением 100-125 кВ толщина общего фильтра должна быть эквивалентна 4 мм алюминия, а для напряжений 70-80 кВ необходимо применение фильтра толщиной 2 мм. Установка алюминиевого фильтра толщиной 2 мм привела к полному поглощению излучение с поверхности графита, как видно на рисунке 7.в. Данное изображение фокусного пятна имеет контрастные границы, диаметр равен диаметру вольфрамового стержня.

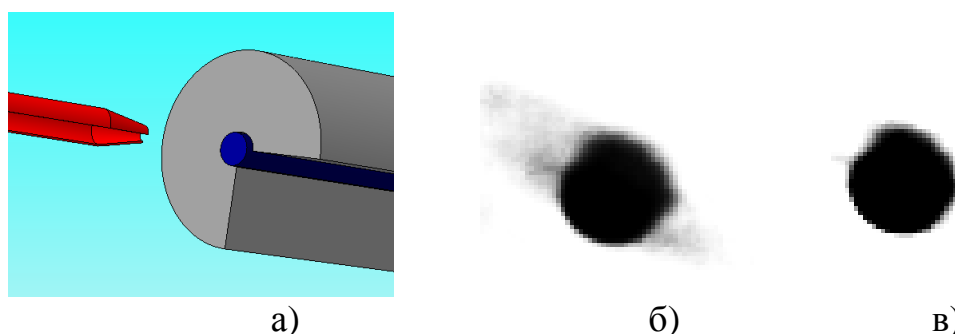
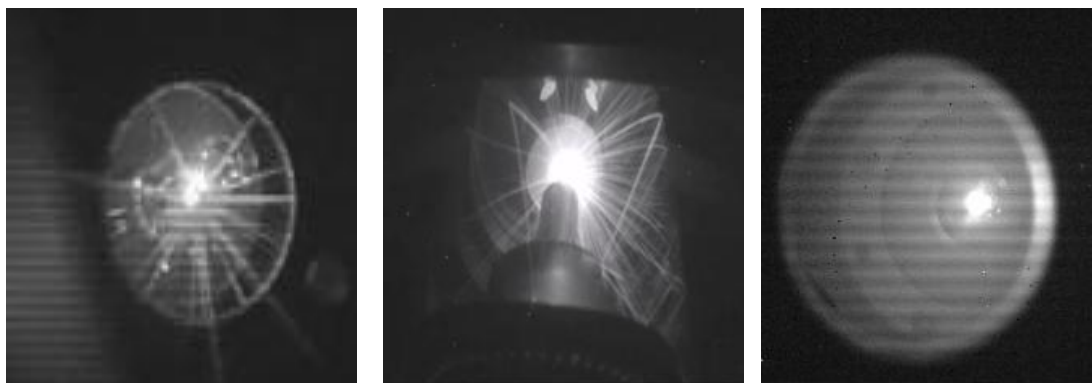


Рисунок 7 – Конструкция РТ с вольфрамографитовым анодом – а); фокусное пятно диаметром 1,5 мм без дополнительного фильтра – б); фокусное пятно диаметром 1,5 мм с использованием фильтра – Al толщиной 2 мм – в).

Таким образом, диаметр фокусного пятна для взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с комбинированным вольфрамографитовым анодом составил 1,5 мм, что соответствует диаметру вольфрамового стержня. Размеры фокусного пятна для

взрывоэмиссионной рентгеновской трубки не зависят от фокусировки электронного пучка, а зависят от размера области анода, выполненной из вольфрама.

На рисунках 8.а, 8.б показаны видеокadres анодов взрывоэмиссионных РТ в момент работы, когда превышена допустимая тепловая мощность, а на рисунке 8.в показан видеокادر стабильной работы РТ. Стабильная работа РТ наблюдается для случая, когда используется комбинированный вольфрамографитовый анод.



а) анод без радиатора

б) анод с медным радиатором

в) вольфрамо-графитовый анод

$P = 0,15$ кВт, $t = 0,5$ с

$P = 1,5$ кВт, $t = 0,5$ с

$P = 3$ кВт, $t = 0,5$ с

Рисунок 8 – Видеокadres различных типов анодов во время работы
а), б) заметен разлет материала анода, в) стабильная работа.

P - средняя мощность, рассеиваемая на аноде, t – время экспозиции

Оценка ресурса работы определена путем измерения мощности дозы излучения после наработки РТ нескольких серий по $1 \cdot 10^5$ импульсов в повторно-кратковременном режиме работы, то есть при средней мощности, подводимой к РТ – 3,0 кВт, и времени экспозиции 0,5 с. После наработки $2 \cdot 10^6$ импульсов мощность дозы снизилась на 2 % от первоначального значения, наблюдается незначительная эрозия поверхности анода. За срок службы РТ принимается такое количество включений в типовом повторно-кратковременном режиме работы, за которое доза излучения уменьшится не более чем на 30% [8]. Таким образом, можно сделать вывод, что после наработки РТ 10^7 импульсов доза излучения снизится примерно на 20 – 25 %.

В **четвертой главе** показано, что разработанная рентгеновская трубка позволяет реализовать оперативную регулировку эффективной энергии рентгеновского излучения в импульсных аппаратах с индуктивным накопителем энергии. Также исследована работа данного типа аппаратов с цифровыми плоскопанельными детекторами рентгеновского излучения. Описано создание малогабаритного дефектоскопа.

Для импульсных рентгеновских аппаратов с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока разработана электрическая система регулировки выходного напряжения, устанавливаемая в низковольтной части высоковольтного генератора, что затруднительно для генераторов с емкостным накопителем и газонаполненным неуправляемым разрядником-обострителем.

Получена зависимость выходного напряжения от напряжения на первичном накопителе, результаты эксперимента приведены на рис. 9.

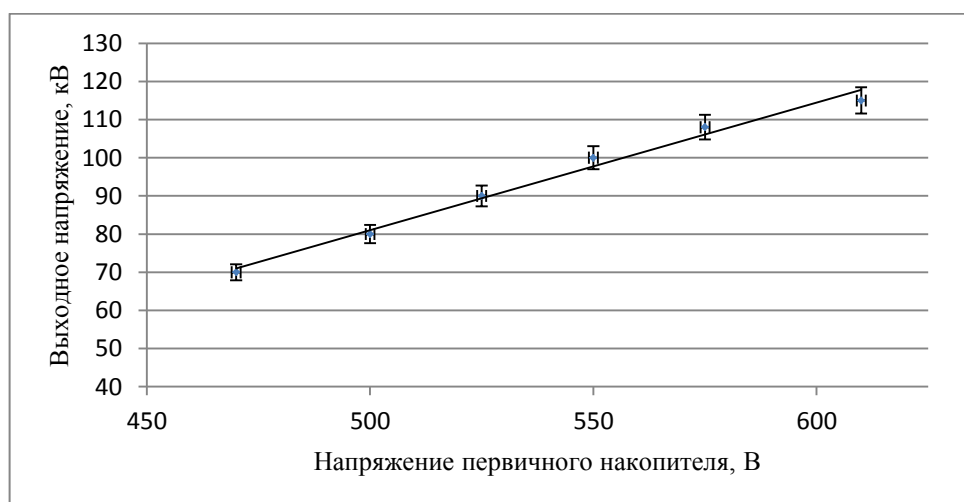


Рисунок 9 – Зависимость выходного напряжения генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока на нагрузке 1 кОм в зависимости от напряжения первичного накопителя.

Как видно из приведенного рисунка, изменение напряжения конденсатора первичного накопителя от 450 до 610 В приводит к пропорциональному изменению выходного напряжения от 70 до 120 кВ. Диапазон изменения напряжения имеет границы. Дальнейшее снижение напряжения первичного накопителя ниже 450 В приводит к выходу контуров магнитного генератора из согласованного режима.

Подключение разработанной трубки показало, что во всем диапазоне напряжений происходит стабильная генерация рентгеновского излучения, рисунок 10.

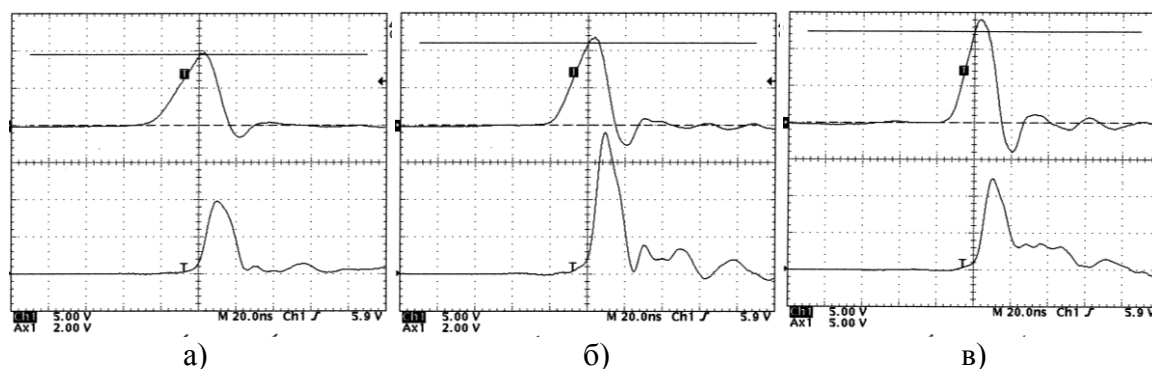


Рисунок 10 – Осциллограммы напряжения (сверху) и тока (снизу) рентгеновской трубки при различной скорости нарастания импульса напряжения а) $U_{C2} = 470$ В, $dU/dt = 2,5 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 70$ кВ, $I_{max} = 100$ А; б) $U_{C2} = 520$ В, $dU/dt = 4,5 \cdot 10^{12}$ В/с, $U_{max} = 85$ кВ; $I_{max} = 175$ А; в) $U_{C2} = 630$ В, $dU/dt = 10^{13}$ В/с, $U_{max} = 120$ кВ; $I_{max} = 300$ А. U_{C2} – амплитудное значение напряжения первичного накопителя, dU/dt – скорость нарастания выходного напряжения, U_{max} – максимальное значение выходного напряжения, I_{max} – максимальное значение выходного тока.

Произведено сравнение изображений, полученных с помощью импульсного рентгеновского аппарата с индуктивным накопителем энергии и импульсного рентгеновского аппарата с емкостным накопителем энергии (рисунок 11).

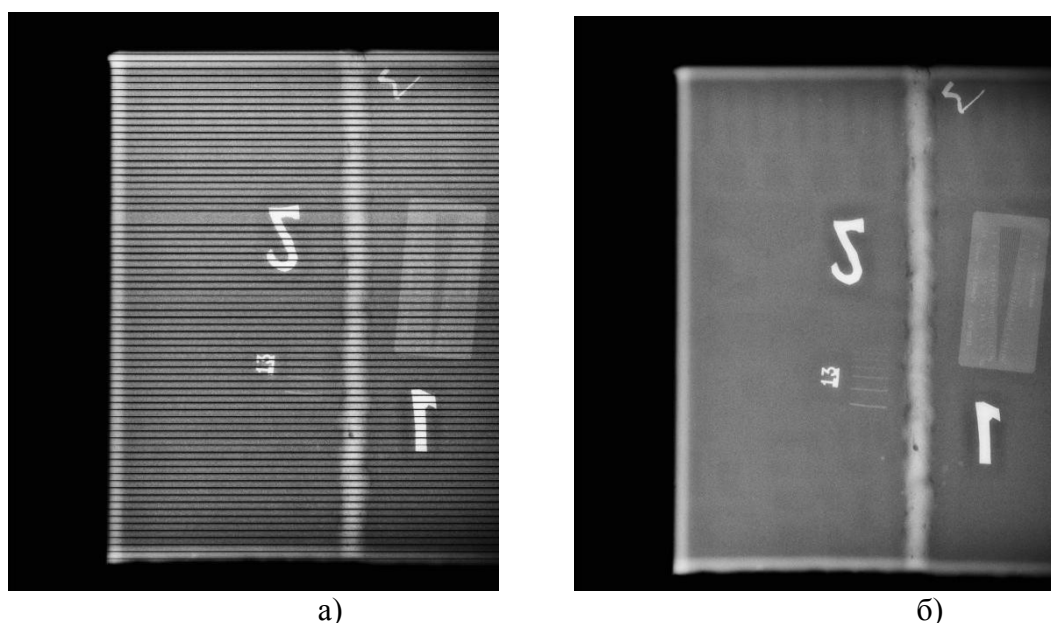


Рисунок 11 – Рентгеновские изображения, полученные на цифровой плоскопанельный рентгеновский детектор PerkinElmer Dexela 1512NDT.

- а) импульсный аппарат с емкостным накопителем энергии Арина-3, $f = 10$ Гц,
 б) импульсный аппарат с индуктивным накопителем, $f = 5$ кГц.

При работе в видео режиме аппарат с индуктивным накопителем энергии дает качественное изображение без горизонтальных полос при частоте следования импульсов выше 500 Гц без применения дополнительных устройств синхронизации цифрового приемника и импульсного источника излучения. С учетом повышенной мощности, достигнутой на взрывоэмиссионной рентгеновской трубке с искусственными углеродными материалами, удается получать качественное видеоизображение, вполне конкурентоспособное в сравнении с рентгенодиагностическими комплексами, где применяются аппараты постоянного тока.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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

5. 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.

6. 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.

7. Показано, что разработанная острофокусная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными электродами позволяет регулировать напряжение включения трубки в диапазоне от 70 до 120 кВ при импульсном токе до 300 А, средней выходной мощности до 3 кВт.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Chepusov, A. Surface modification of field emission cathodes made of artificial carbon-based material / A. Chepusov, S. Cholakh, E. Kislov, A. Komarsky, V. Kuznetsov, S. Niculin, D. Skomorokhov // Phys. Status Solidi C. – 2013. – V. 10. – № 4. – P. 614–618.

2. Kislov E. A. XPS studies on surfaces of field emission cathodes made of artificial carbon materials / E.A. Kislov, A.A. Komarsky, V.L. Kuznetsov, S.P. Nikulin, D.S. Skomarokhov, A.S. Chepusov, and S.O. Cholakh// Journal of applied spectroscopy. – 2013. – V. 80. – №2. – P. 216-220.

3. Баянкин С. Н. 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.

4. Chepusov A. 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.

5. Бессонова В. А. Снижение дозовой нагрузки на пациента при проведении диагностики с помощью цифровых импульсных наносекундных рентгеновских комплексов / В.А. Бессонова, П.В. Гаврилов, А.А. Комарский, С.Р. Корженевский, А.С. Чепусов // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2016. – Том 61.- №2. – С. 53 – 57.

6. Корженевский С.Р. Выбор режимов электрогидравлического дробления кварцевой руды / С.Р. Корженевский, В.А. Бессонова, А.А. Комарский, В.А. Мотовилов, А.С. Чепусов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – №3 – С. 70 – 74.

7. Корженевский С.Р. 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.

Патенты:

1. Кузнецов, В. Л. Моноблок портативного рентгеновского аппарата / В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский, А. С. Чепусов // Патент на полезную модель № 130179. 29.01.2013.

2. Кузнецов, В. Л. Импульсная металло-керамическая рентгеновская трубка / В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский, А. С. Чепусов // Патент на полезную модель № 130135. 29.12.2012.

3. Корженевский С.Р. Устройство и способ облучения рентгенолюминофоров рентгеновизиализирующих устройств, работающих как в режиме рентгенографии, так и рентгеноскопии / М.Я. Грин, М.А. Дворцов, С.Р. Корженевский, Н.С. Корженевский, А.А. Комарский, Д.Л. Солодов, А.С. Чепусов, В.Н. Титов (RU) // Патент на изобретение № 2016122265/28. 06.06.2016

Тезисы конференций:

1. Комарский А. А. Импульсные рентгеновские аппараты с индуктивным накопителем энергии / Кузнецов В.Л., Корженевский С.Р., Бессонова В.А., Комарский А.А., Чепусов А.С., Бочков В.Д., Бочков Д.В., Панов П.В., Терешин В.И., Трубицын А.А., Грин М.Я., Солодов Д.Л. // *Материалы II Всероссийской конференции производителей рентгеновской техники*, С-Петербург. – 2015. – С. 74 – 78.

2. Кузнецов В.Л. Влияние ионной бомбардировки на структуру поверхности автоэмиссионного катода / В. Л. Кузнецов, В. А. Терентьева, С. В. Петров, Д. С. Скоморохов, Е. А. Кислов, А. С. Чепусов, А. А. Комарский // Тезисы докладов, Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества. – 2010. – С. 208.

3. Комарский А. А. Влияние ионной бомбардировки на автоэмиссионные свойства ИУМ / А. А. Комарский, Н. С. Безводинских, Е. А. Кислов, В. Л. Кузнецов, Д. С. Скоморохов, А. С. Чепусов, С. О. Чолах / Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г. Красноярск). – 2012. – С. - 266.

4. Чепусов А.С. Установка для испытаний импульсных рентгеновских трубок с взрывоэмиссионными металлокерамическими катодами / А. С. Чепусов, А. А. Комарский, Е. А. Кислов, В. Л. Кузнецов, Д. С. Скоморохов, С. О. Чолах // Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г. Красноярск). – 2012. – С. 278.

5. Кислов Е. А. Исследование углеродных автокатодов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Е. А. Кислов, А. А. Комарский, В. Л. Кузнецов, Д.С. Скоморохов, А. С. Чепусов // Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г. Красноярск). – 2012. – С. 132 – 133.

6. Комарский А. А. Автоэмиссионные свойства искусственных углеродных материалов / А. А. Комарский, А. С. Чепусов, Е.А. Кислов, В. Л. Кузнецов // Сборник тезисов, материалы XIII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-XIII. г. Екатеринбург). – 2012. – С. 224.

7. Комарский А. А. Исследование кольцевых взрывоэмиссионных катодов / А. А. Комарский, А. С. Чепусов, С. Р. Корженевский, В. Л. Кузнецов, В. А. Бессонова, В. В. Криницин // Сборник тезисов, материалы XV Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-XV. г. Екатеринбург). – 2014. – С. 171.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Filatov, A.L. Compact repetitive generators for medical x-ray diagnostics / A. L. Filatov, S. R. Korzhenevskii, Yu. A. Kotov // Proc. XI Intern. Conf. on High Power Particle deams. – 1996. – P. 909 – 912.

2. Котов Ю. А. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов / Ю. А. Котов, Г. А. Месяц, С. Н. Рукин, А. Л. Филатов // Докл. РАН. – 1993. – Т. 330. - № 3. – С. 315 – 317.
3. Корженевский С.Р. Высокочастотные наносекундные генераторы для интроскопии и селективного разрушения твердых тел микронных размеров: дис. ... канд. техн. наук / Корженевский Сергей Романович. – Екатеринбург. – 2008. – 135 с.
4. Васильев П. В. Наносекундный SOS генератор с частотой следования импульсов 20 кГц / П. В. Васильев, С. К. Любутин, М. С. Педос, А. В. Пономарев, С. Н. Рукин, Б. Г. Словицкий, С. П. Тимошенко, С. О. Чолах // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 6. – С. 62 – 67.
5. Скоморохов, Д. С. Острофокусная двухэлектродная импульсная рентгеновская трубка / Д. С. Скоморохов, В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский // Патент RU 2479883. – 20.04.2013.
6. Шешин, Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов / Е. П. Шешин. – М.: МФТИ, 2001. – 274 с.
7. Комарский, А. А. Исследование кольцевых взрывоэмиссионных катодов / А. А. Комарский, А. С. Чепусов, С. Р. Корженевский, В. Л. Кузнецов, В. А. Бессонова, В. В. Криницин // Сборник тезисов, материалы XV Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-XV. г. Екатеринбург). – 2014. – С. 171.
8. Блинов, Н. Н. Рентгенодиагностические аппараты / Н. Н. Блинов, Л. В. Владимиров, Г. П. Кочетова, Н. А. Туманов, А. З. Шварцман, А. М. Якобсон, В. Л. Ярославский. – М., «Медицина». – 1976. – 240 с.