

На правах рукописи



Тищенко Артем Александрович

**ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ
ИМПРЕГНИРОВАННЫЙ КАТОД ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
АМПЛИТРОНОВ С-ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ
ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Зоркин Александр Яковлевич

Официальные оппоненты: Шестеркин Василий Иванович - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-производственный центр «Электронные системы» АО «НПП«Алмаз», г. Саратов

Ханбеков Иван Фэритович - кандидат технических наук, начальник инновационного научно-производственного комплекса АО «Плутон», г. Москва

Ведущая организация: Саратовский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Саратов

Защита диссертации состоится «04» апреля 2023 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГРТУ имени Уткина В.Ф. и на сайте www.rsreu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

24.2.375.02 д.ф.-м. н., доцент

Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие технологий изготовления катодов и эмиссионных материалов для их изготовления шло параллельно с развитием СВЧ электроники, применяемой при создании военной и гражданской аппаратуры, требующей большой мощности в СВЧ диапазоне частот.

Катодный узел в ЭВП СВЧ является элементом, определяющим его долговечность (долговечность анода и остальных элементов на порядок больше). При решении задачи создания выходных каскадов комплексированных СВЧ устройств основной проблемой является разработка катодного узла, способного рассеивать на рабочей поверхности высокий уровень средней мощности и иметь стойкость к высоким импульсным термомеханическим нагрузкам, вызванным обратной импульсной электронной и ионной бомбардировкой поверхности катода. С ростом импульсной мощности приборов повышались требования к эмиссионным характеристикам катодов, а с её дальнейшим увеличением появились требования стойкости к импульсному нагреву.

Задача увеличения импульсной мощности и отвода средней мощности с поверхности катода – $150-300 \text{ Вт/см}^2$, что на порядок превышает допустимые значения для применяемых в настоящее время материалов и конструкций катодных узлов (эмиттеры на основе сплавов PtBa и PdBa – $40-50 \text{ Вт/см}^2$, алюминатный катод – $20-30 \text{ Вт/см}^2$), решалась применением металлокерамических катодов, способных отвести до $50-100 \text{ Вт/см}^2$ средней мощности и отвечающих требованиям высокой стойкости к обратной импульсной электронной и ионной бомбардировке, но обладающими низкой тепло- и электропроводностью. Для увеличения средней мощности импульсных приборов были созданы и внедрены металлосплавные катоды, отличающиеся высокой теплопроводностью, низким электрическим сопротивлением и технологичностью изготовления. Однако в мощных импульсных приборах применение данных катодов не обеспечивает долговечности более 1000-2000 часов. Данное ограничение связано с низкой стойкостью металлов платиновой группы к разрушающей способности импульсных температур. Для обеспечения предъявляемых требований к катоду перспективным направлением в создании мощных импульсных ЭВП СВЧ М-типа при разработке катодного узла является применение вторично-эмиссионных металлокерамических импрегнированных катодов, под которыми понимают катоды, эмитирующий слой которых представляет собой пористую губку – матрицу из тугоплавкого металла, как правило, вольфрама пропитанного композиционными эмиссионно-активными материалами на основе тугоплавких металлов и оксидов, таких как алюминат бария-кальция (Ba-Ca) $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ и алюминат иттрия (Y) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$.

Степень разработанности

Проблемам катодной тематики приборов М-типа были посвящены работы Б.Ч. Дюбуа, В.Д. Котова, Н.П. Есаулова, В.П. Марина, И.П. Ли, Г.А. Кудинцевой, А.С. Мясникова и других.

К моменту постановки данной работы отсутствовала информация о применении металлокерамических пропитанных оксидами тугоплавких металлов эмиттеров в водоохлаждаемых вторично-эмиссионных катодах для мощных электровакуумных СВЧ приборов М-типа.

Актуальным является разработка вторично-эмиссионного металлокерамического импрегнированного катода для мощных импульсных ЭВП СВЧ, технологии получения эмиссионно-активных материалов заданного химического состава с необходимыми физическими свойствами, а также изготовление на их основе катодов с требуемыми эмиссионными характеристиками, тепло- и электропроводностью, устойчивостью к импульсным термомеханическим и эрозионным нагрузкам.

Цель диссертационной работы

Целью работы является разработка вторично-эмиссионного металлокерамического импрегнированного катода устойчивого к термомеханическим нагрузкам с коэффициентом вторичной электронной эмиссии не ниже 2,6 в диапазоне энергий первичных электронов 500-700 эВ для мощных импульсных амплитронов С-диапазона частот с мгновенной готовностью и долговечностью не менее 6000 часов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Разработать технологию изготовления вторично-эмиссионного металлокерамического импрегнированного катода со стабильным коэффициентом вторичной электронной эмиссии не ниже 2,6, мгновенной готовностью и устойчивой работой катода в амплитроне на всем сроке службы.

2 Разработать конструкцию катодного узла с высокой термомеханической устойчивостью, обеспечивающую долговечность работы не менее 6000 часов.

3 Разработать методику циклических термомеханических испытаний для определения устойчивости катодных узлов к циклическому нагреву.

4 Провести исследования вторично-эмиссионных характеристик эмиттеров катодов.

5 Изготовить и испытать опытные амплитроны с разработанными катодами, провести анализ технических и эксплуатационных характеристик приборов.

6 Разработать методику ускоренных испытаний оценки безотказности амплитрона.

Объект исследования – вторично-эмиссионный металлокерамический импрегнированный катод для мощных импульсных амплитронов С-диапазона частот, обладающий требуемым коэффициентом вторичной электронной эмиссии и стойкостью к термомеханическим и эрозионным нагрузкам.

Предмет исследования – конструктивные особенности, термические модели, физические и химические закономерности, технологические процессы и их режимы, позволяющие создать вторично-эмиссионный

металлокерамический импрегнированный катод с заданными эмиссионными характеристиками отвечающий всем техническим требованиям, предъявляемым к катоду и прибору.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1 Моделирование тепловых процессов в катоде в сочетании с экспериментальным калориметрическим методом позволяет определить температуру эмиссионных втулок и обеспечить заданную долговечность катода. Для металлокерамического катода диаметром 18 мм с пропиткой вольфрамовой матрицы пористостью 25-28% эмиссионно-активным материалом состава $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ от 7,5 до 8% по массе при температуре 1750°C обеспечивает мгновенную готовность прибора, коэффициент вторичной электронной эмиссии не ниже 2,6 и долговечность не менее 6000 часов при рабочей температуре катода $800-830^\circ\text{C}$.

2 Применение водяного охлаждения позволяет регулировать температуру катода за счет изменения термического сопротивления. Отводимая мощность в этом случае ограничивается коэффициентом теплоотдачи между внутренней поверхностью катода и теплоносителем ($\alpha < 3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}$), а так же температурой внутренней поверхности 100°C . Предельная отводимая мощность для разрабатываемого катода составляет 120 Вт/см^2 . Предельная отводимая мощность без водяного охлаждения определяется теплоотводом по катодной ножке и ограничивается предельной температурой катода 1100°C . Долговечность катода при такой температуре не превышает 500 часов.

3 Пропитка матрицы алюминатом иттрия требует рабочих температур катода более 1000°C , что ограничивает долговечность прибора не более 100 часов. Пропитка алюминатом иттрия с присадкой оксида магния (10-11% по массе) ограничивает долговечность прибора до 25 часов, вследствие интенсивного испарения оксида магния.

4. Разработана и применена методика оценки безотказности амплитрона, которая в отличие от существующих методик устанавливает методы ускоренной оценки безотказности при проведении кратковременных испытаний на безотказность, за счет форсирования режима испытаний учитывающего процесс разрушения теплонагруженных электродов. Ввиду относительной простоты и приемлемой точности получаемых результатов данная методика может быть использована при разработке перспективных вторично-эмиссионных катодов для амплитронов.

Практическая и теоретическая значимость.

Разработана конструкция вторично-эмиссионного металлокерамического импрегнированного катода с водяным охлаждением и подтвержденная разработанной методикой оценки безотказности амплитрона, способная обеспечить требуемые параметры мощного импульсного амплитрона С-диапазона частот, такие как выходная мощность, длительность импульса, скважность, зона устойчивой работы по анодному току и т.д., увеличить срок службы прибора до 6000 часов и более за счет

повышения устойчивости катода к интенсивной обратной импульсной электронной и ионной бомбардировке, микро разрядам и импульсным термомеханическим нагрузкам, а так же поддерживать рабочую температуру катода во всех режимах работы прибора.

Разработан технологический процесс получения высокоэффективных эмиссионно-активных материалов, позволяющий получить требуемые физические и эмиссионные характеристики вторично-эмиссионных катодов и обеспечить мгновенную готовность прибора.

Разработан технологический процесс изготовления вторично-эмиссионного металлокерамического узла с учетом особенностей всех применяемых в нём материалов, прочностные свойства которых подтверждены циклическими термомеханическими испытаниями, проведенными по разработанной методике, которая в отличие от других позволяет без установки в прибор смоделировать тепловые режимы работы катода.

Разработка вторично-эмиссионного металлокерамического катода для мощного импульсного амплитрона, с высокостабильными эмиссионными характеристиками, повышенной устойчивостью к термомеханическим и эрозийным нагрузкам, со сроком службы не менее 6000 часов, технологического процесса получения эмиссионно-активного материала, а также конструкции катодного узла с водяным охлаждением и возможность регулирования рабочей температуры эмиттера.

Методы исследований.

В диссертационном исследовании применялись методы численного моделирования термомеханических процессов, проходящих в катодном узле на этапе его изготовления и работы в амплитроне при помощи пакета программного обеспечения CST STUDIO SUITE. Исследование поверхностей элементов катодного узла проводилось методами панорамной микроскопии с помощью микроскопа OLYMPUS BX53M и анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS 800. Исследования эмиссионно-активного материала выполнялось методами растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и цветной катодолюминесценции.

Измерение коэффициента вторичной электронной эмиссии проводилось на установке контроля характеристик эмиссионных материалов электронно-лучевым методом. Оценка долговечности проводилась по разработанной методике ускоренных испытаний.

Использовалось современное оборудование для решения возникающих в процессе выполнения работы технических и технологических проблем: векторный анализатор цепей Rohde & Schwarz ZVA 8, измеритель мощности Rohde & Schwarz NRP2, осциллограф АКИП-4115/3А, прецизионный токарно-винторезный станок LZ 250 SN, пирометр марки Keller серии CellaTemp PA, пирометр Термоконт-ТМ5П, водородная печь ПВД 1.140×200-2200, трубчатая печь С 2,8 1700 1Ф, установка лазерной сварки и наплавки МУЛ-1(В)-100-Б, установка термомеханических испытаний.

Динамические испытания макетных образцов приборов с катодами, разработанными в ходе выполнения диссертационной работы, проводились при нормальных климатических условиях, установленных ГОСТ РВ 20.57.416 на специальном испытательном оборудовании.

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Вторично-эмиссионный металлокерамический катод, с эмиттером, изготовленным путем пропитки вольфрамовой матрицы пористостью 25-28% эмиссионно-активным материалом состава $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ от 7,5 до 8% по массе обеспечивает мгновенную готовность прибора и коэффициента вторичной электронной эмиссии не ниже 2,6 (Пат. на полезную модель RU 182187U1).

2 Конструкция вторично-эмиссионного металлокерамического водоохлаждаемого катода позволяет установить температуру на поверхности эмиттера 800-830°C за счет регулировки термического сопротивления и для алюминатного барий-кальциевого катода обеспечивает в номинальном режиме работы амплитрона долговечность не менее 6000 часов, что подтверждается снижением рассеиваемой мощности на катоде и установлением баланса скорости распыления-испарения эмиссионно-активного материала и скорости восстановления рабочей поверхности за счет диффузии. (Пат. на полезную модель RU 211839 U1, Пат. на полезную модель RU 176929 U1)

3 Устойчивость катода к термомеханическим нагрузкам обеспечивается за счет конструкции катода и технологии изготовления вольфрамовых матриц, а также режимов пайки эмиттера и подтверждена циклическими термомеханическими испытаниями по разработанной методике, которая в отличие от других позволяет без установки в прибор смоделировать тепловые режимы работы катода и провести исследования прочностных свойств, примененных материалов, определить их устойчивость к циклическому нагреву и способность сохранять вакуумную плотность после циклических термических нагрузок, вызванных включением и выключением амплитрона.

4 Амплитрон с разработанным катодом, обеспечил технические требования, установленные техническим заданием, и подтвердил заданную долговечность при проведении испытаний по разработанной методике оценки безотказности амплитрона, которая в отличие от существующих методик устанавливает методы кратковременных испытаний на безотказность, за счет форсирования режима испытаний, учитывающего процесс разрушения теплонагруженного катода.

Достоверность, обоснованность результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, подтверждены получением воспроизводимых и повторяемых результатов с использованием различного метрологического оборудования и применением различных методов исследования, освоением амплитронов с разработанным катодом в серийном производстве, эксплуатацией изделий в аппаратуре, а так же публикацией основных результатов диссертации в ведущих Российских научных

изданиях, входящих в перечень, рекомендованных ВАК, а также получением патентов на полезную модель.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на Международной научно-практической конференции «Инжиниринг Техно», 2015 г.; на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016». Научно-технический отчет по выполнению ОКР; Технический отчет «Разработка технологии изготовления танталовой фольги толщиной 2-4 мкм для комбинированного катодного узла СВЧ приборов М-типа»; Технический отчет «Разработка технологии изготовления комбинированного катодного узла для СВЧ приборов с безнакальным включением».

Вторично-эмиссионный металлокерамический катод, разработанный в ходе выполнения диссертационной работы, а так же разработанная технология получения эмиссионно-активного материала, технология изготовления и конструкция катодного узла внедрены в производство мощных импульсных амплитронов, являющихся выходными каскадами комплектированных СВЧ усилителей, изготавливаемых в Научно-Производственном центре мощной высоковольтной СВЧ аппаратуры и её компонентов АО «Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца» (АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“») (Акт внедрения результатов диссертационной работы ведущего технолога отдела разработки мощной высоковольтной СВЧ аппаратуры и ее компонентов АО РТИ НПЦ-5).

Результаты кандидатской диссертации использованы при проведении учебного процесса по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. (Акт об использовании результатов кандидатской диссертации Тищенко А.А. «Вторично-эмиссионный металлокерамический импрегнированный катод для мощных импульсных амплитронов С-диапазона с повышенной долговечностью» в учебном процессе).

Научная специальность, которой соответствует диссертация

Диссертация соответствует пункту 5. Исследования и разработка технологии изготовления как приборов в целом, так и их основных узлов, специального оборудования, систем создания и поддержания вакуума, компонентов и материалов паспорта научной специальности

2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 работа в единой реферативной базе данных Scopus, 12 статей в научных сборниках и журналах, получено 4 патента на полезную модель.

Личный вклад автора:

1. Автором сформулированы цели и задач исследований, направленных на разработку вторично-эмиссионного металлокерамического

импрегнированного катода для мощного амплитрона повышенной долговечности.

2. Автор является соисполнителем разработки катода для амплитрона и представленных экспериментальных исследований.

3. Автор принимал непосредственное участие в: разработке конструкции вторично-эмиссионного металлокерамического импрегнированного катода с водяным охлаждением; отработке технологических процессов изготовления вольфрамовых матриц, получении эмиссионно-активных материалов, пропитывания эмиссионно-активными материалами матриц, пайки, активировки катода; разработке и изготовлении специального технологического оборудования для проведения экспериментальных исследований; разработке методик и проведении динамических испытаний амплитрона с разработанным вторично-эмиссионным металлокерамическим импрегнированным катодом; обсуждении полученных технических результатов исследований.

4. Автором сформулированы выводы по результатам проведенной диссертационной работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 101 наименование и 2 приложений. Диссертация изложена на 117 листах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность и целесообразность выбранной темы диссертационного исследования, анализируется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, изложены научная новизна, практическое значение результатов диссертационных исследований, сформулированы научные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечен личный вклад соискателя, приведены данные об апробации и внедрении результатов работы, публикации.

В первой главе содержится обзор существующих материалов и способов изготовления вторично-эмиссионных катодов ЭВП СВЧ М-типа. Представлены конструкции катодов прямого и косвенного накала, комбинированного катода, вторично-эмиссионного «холодного» катода с металлокерамическим и металлосплавным эмиттером.

Во второй главе проводится исследование и разработка технологических процессов изготовления металлокерамических вторично-эмиссионных катодов с заданными эмиссионными характеристиками, устойчивых к термомеханическим нагрузкам.

При эксплуатации катода в мощном импульсном амплитроне при включении и выключении катод испытывает значительные циклические нагрузки. При таких нагрузках необходимо, чтобы геометрические размеры катодного зерна, а следовательно, и катода не изменялись или изменялись очень незначительно, не внося нарушений в работу амплитрона и материал катодного зерна оставался вакуумноплотным.

Рабочая температура катодов в мощных амплитронах поддерживается за счет обратной импульсной электронной бомбардировки с выделением мощности на катоде от 5 до 10% от мощности, подводимой к амплитрону. Однако даже при использовании катода из чистого вольфрама, который имеет наиболее высокую рабочую температуру в вакууме, мощность, рассеиваемая на катоде, составляет величину меньшую чем 200 Вт/см². Для отвода значительной средней мощности от катода применено принудительное охлаждение.

Материалами для керна катода могут быть сплавы ВР-27, МР-47ВП, чистый ниобий и сплавы на его основе НВ-7, НВ-23. Такие материалы, как ВР-27, МР-47ВП механически обрабатываются с большим трудом и не обеспечивают требуемой шероховатости поверхности.

Разработана методика циклических термомеханических испытаний, позволяющая провести исследования прочностных свойств материалов и определить их устойчивость к циклическому нагреву и способность сохранять вакуумную плотность после циклических термических нагрузок, вызванных включением и выключением амплитрона. По результатам испытаний в качестве материала керна катода выбран сплав НВ-7, обладающий коррозионной устойчивостью к воздействию охлаждающей жидкости и не требующий дополнительных мероприятий защиты от коррозии.

Проведены исследования фазового и химического состава эмиссионно-активного материала вторично-эмиссионного катода, изготовленного по классической технологии, до его установки в амплитрон. Результаты исследований свидетельствуют о несовершенстве применяемой технологии изготовления и необходимости контроля фазового и химического состава катодов на всех этапах их изготовления. Качество вторично-эмиссионного металлокерамического катода в значительной мере определяется технологией изготовления матрицы, способом введения эмиссионно-активного материала, подготовкой деталей и компонентов, сборкой и т.д.

Анализ микроструктуры матриц катодов, изготовленных по классической технологии (рисунок 1, а), показывает наличие ярко выраженной неравномерности распределения пор, размеры которых достигают 100 мкм и более. Для исключения крупных пор была применена технология гидростатического прессования с предварительным вакуумированием шихты (рисунок 1, б).

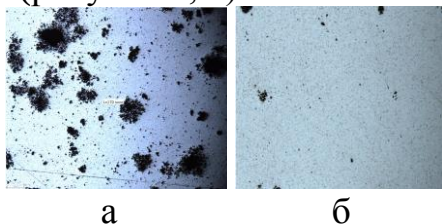


Рисунок 1 – Микроструктура вольфрамовой матрицы (×100):

а – изготовленной по классической технологии, б – прессованных гидростатическим методом прессования с предварительным вакуумированием шихты

Проведённые исследования режимов изготовления эмиссионно-активного материала показали необходимость повышения температуры отжига гидроксида алюминия с 800 до 1200°C, введения гидростатического прессования штабиков при давлении 2 Т/см² взамен прессования в стальных пресс-формах, увеличения времени подъема температуры с 160 до 200 минут, снижения времени пропитки с 7 до 3 минут, а также проведение пропитки вольфрамовых матриц алюминатом бария-кальция $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ при температуре 1750°C или алюмината иттрия $2\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – 2020°C в течении 3 минут.

При изготовлении вторично-эмиссионных втулок металлокерамического катода по разработанной технологии, на рабочей поверхности втулок отсутствуют дефекты (рисунок 2, б) в отличие от образцов, изготовленных по классической технологии (рисунок 2, а), что говорит об их механической прочности. В результате воздействия лазерного излучения обеспечивается равномерное вскрытие и распределение на эмитирующей поверхности завальцованных пор, заполненных эмиссионно-активным материалом, что обеспечивает требуемый КВЭЭ.

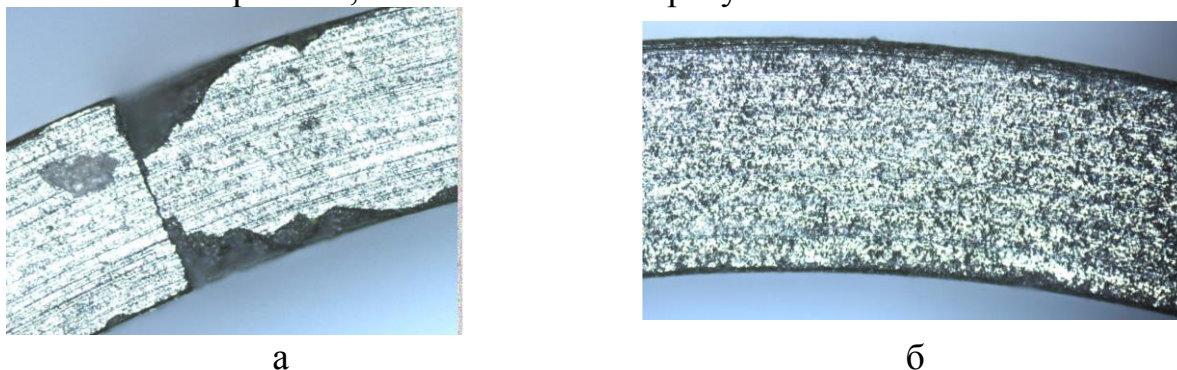


Рисунок 2 – Образцы эмиттерных втулок (×100):

- а – изготовленные по классической технологии, после токарной обработки,
- б – изготовленные по разработанной технологии, после токарной обработки

В третьей главе проведены исследования зависимости эмиссионных характеристик эмиссионно-активных материалов вторично-эмиссионных катодов от технологии изготовления.

Для проведения измерений коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) была применена установка контроля характеристик эмиссионных материалов ШИВА.442276.001, разработанная и изготовленная в НПЦ-5 АО РТИ в ходе выполнения ОКР «Сальто», позволяющая измерять КВЭЭ в полуавтоматическом или автоматическом (по заранее введенной в управляющий компьютер программе) режимах.

Для исследования вторично-эмиссионных характеристик эмиссионно-активных материалов применялся электронно-лучевой метод, обеспечивающий наибольшую точность измерений на образцах в виде диска.

Анализ исследований прототипа показывает, что необходимое значение КВЭЭ для вторично-эмиссионных катодов для данного амплитрона должно быть не ниже 2,6 и достигаться при энергии первичных электронов от 500 эВ до 700 эВ.

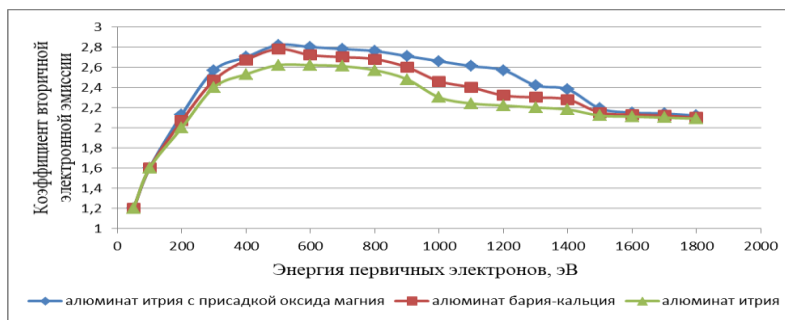


Рисунок 3 – Усредненная зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии первичных электронов

По результатам проведенных исследований образцов, изготовленных по разработанной технологии, установлено, что вторично-эмиссионный металлокерамический катод, с эмиттером, изготовленным путем пропитки при температуре 1750°C вольфрамовой матрицы пористостью 25-28% эмиссионно-активным материалом состава $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ от 7,5 до 8% по массе обеспечивает максимальный КВЭЭ не ниже 2,6 в диапазоне энергий первичных электронов 500-700 эВ.

В четвертой главе разработана конструкция вторично-эмиссионного импрегнированного катода, позволяющая регулировать температуру эмиссионной втулки и обеспечивающего мгновенную готовность, а так же стабильную работу амплитрона на всём сроке службы.

Первоначально катод изготавливался с единой молибденовой втулкой. Применено водяное охлаждение катодного узла. После испытаний образца катодного узла указанной конструкции на установке термомеханических испытаний выявлено разрушение эмиссионной втулки вследствие её деформаций, вызванной термической усадкой.

При применении паяного соединения эмиссионной и молибденовой втулок после проведения термомеханических испытаний образца выявлено разрушение катода в месте пайки молибденовой и эмиссионной втулок. Качество пайки проверить не представлялось возможным вследствие большой протяжённости паяного шва.

Для контроля качества паяного соединения эмиссионной и молибденовой втулок, катод разбили на шесть составных частей, каждая из которых припаивается к керну катода (рисунок 4).

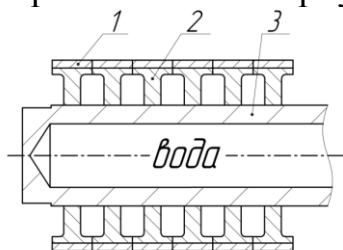


Рисунок 4 – Катодный узел:
1 - эмиссионная втулка, 2 - молибденовая втулка, 3 - керн катода

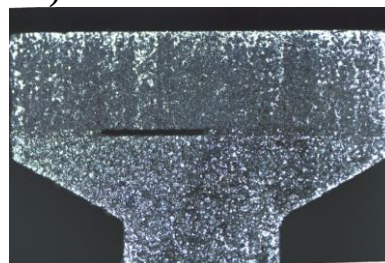


Рисунок 5 – Непропай соединения молибденовой и эмиссионной втулок (×100)

Рабочая температура на поверхности катода при данной конструкции определяется толщиной стенки молибденовой втулки. В ходе испытаний образца на термоциклы данная конструкция также подверглась разрушению.

Так как материал эмиссионной втулки имел пористость, во время пайки значительная часть припоя заполняла поры за счет капиллярного эффекта, и наблюдался непропай (рисунок 5).

Для исключения капиллярного эффекта заполнения пор припоем был применен способ изготовления эмиссионной втулки из пористого вольфрама – матрицы, пропитанной эмиссионно-активным материалом. Данный способ обеспечивал надежное паяное соединение эмиссионной втулки и молибденовой втулки. Также конструкция катода с пропитанной перед пайкой матрицей обладала более высокой тепло- и электропроводностью по сравнению с прессованным катодом. При термомеханических испытаниях разрушения, полученные вследствие термомеханических нагрузок, отсутствуют, что позволило перейти к его дальнейшим испытаниям в составе амплитрона. Были изготовлены опытные амплитроны с катодами разработанной конструкции и изготовленными по разработанному технологическому процессу. При откачке был проведен процесс активировки, заключающийся в термической обработке катода в высоком вакууме в течение нескольких часов.

Динамические испытания проводились при постоянной мощности входного сигнала, на двух точках коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн, разнесённых на 8% друг от друга. В результате испытаний на высоком уровне мощности (ВУМ) было установлено, что после восьмичасового прогона зона устойчивой работы по анодному току снизилась с 80% в начале прогона до 47% в конце прогона. Зона устойчивой работы по анодному току определялась как отношение разницы крайних значений анодного тока зоны устойчивой работы, к среднему значению зоны устойчивой работы. Снижение зоны устойчивой работы по анодному току, было вызвано недостаточной рабочей температурой катода и как следствие малой скоростью диффузии эмиссионно-активного материала на рабочую поверхность катода, в результате чего снизился ток эмиссии.

Для увеличения рабочей температуры катода в молибденовых шайбах выполнили отверстия с целью увеличения их термического сопротивления. Для определения необходимого количества отверстий в молибденовых шайбах и определения распределения температуры по объему катода, было проведено численное моделирование при помощи пакета программного обеспечения CST STUDIO SUITE (рисунок 6, 7).

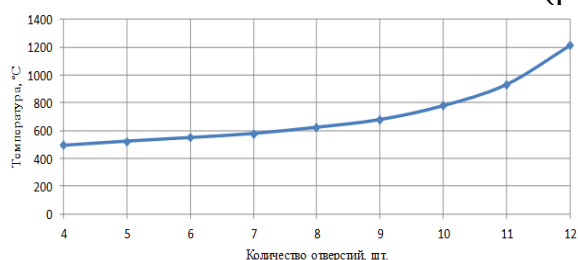


Рисунок 6 – Зависимость температуры на поверхности катода от количества отверстий в молибденовой втулке

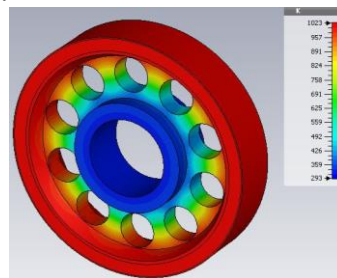


Рисунок 7 – Распределение температуры по объему катода с водяным охлаждением при 10 отверстиях и мощности выделяемой на катоде 1,4 кВт

Катод без водяного охлаждения в номинальном режиме работы опытного амплитрона имеет температуру эмиттера, превышающую допустимую для данной конструкции (более 1200°C), что приводит к разрушению катода (рисунок 8).

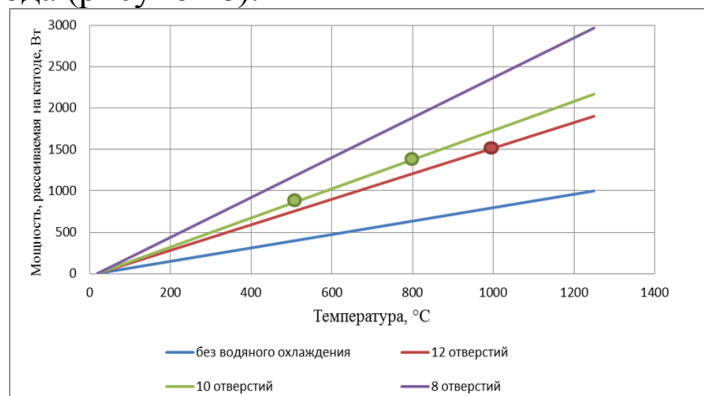


Рисунок 8 – Зависимость рассеиваемой мощности на катоде от температуры эмиттера алюминатно барий-кальциевого катода

При динамических испытаниях опытного амплитрона с восемью отверстиями в молибденовой втулке в алюминатно Ва-Са катоде с водяным охлаждением в номинальном режиме работы опытного амплитрона температура эмиссионной втулки имеет 600°C , а долговечность менее 500 часов, вследствие недостаточной активировки катода в процессе работы и малой скорости диффузии эмиссионно-активного материала на поверхность.

Для повышения температуры эмиссионной втулки испытали опытный амплитрон с катодом с увеличенным термическим сопротивлением (12 отверстий в молибденовой втулке) алюминатно Ва-Са водоохлаждаемого катода в течение пятидесятичасовой наработки в номинальном режиме. Изменений в работе ЭВП СВЧ не было, рассеиваемая мощность составляет 1500 Вт, но температура катода увеличивается до 1000°C (рисунок 8). При испытаниях на циклы включения-выключения после пятидесяти циклов были зафиксированы электрические пробой в приборе, предположительно «говорящие» о разрушении катода (рисунок 9).



Рисунок 9 – Разрушенный катодный узел после вскрытия опытного амплитрона

Разрушение катода произошло не по паяному шву, а по материалам катодного узла, что указывает на превышении допустимых градиентов температуры для выбранного материала.

С целью исключения разрушения катода снизили количество отверстий в молибденовой втулке с 12 до 10 шт. Для испытаний на ВУМ были изготовлены опытные амплитроны с применением в катодных узлах

эмиссионно-активных материалов алюмината бария кальция, алюмината иттрия и алюмината иттрия с присадкой оксида магния.

При динамических испытаниях опытного амплитрона с 10 отверстиями в молибденовой втулке алюминатно-барий кальциевого катода при номинальной мощности опытного амплитрона рассеиваемая мощность на катоде составила 1400 Вт, температура эмиттерной втулки 800°C, а долговечность более 6000 часов. Испытания на ВУМ опытного амплитрона с катодом данной конструкции, изготовленным с применением алюмината бария-кальция, показали, что в первые часы работы прибора зона устойчивой работы по анодному току была 80%. После шестнадцатичасового прогона зона устойчивой работы по анодному току снизилась с 80% до 66% (рисунок 10), и застabilизировалась.

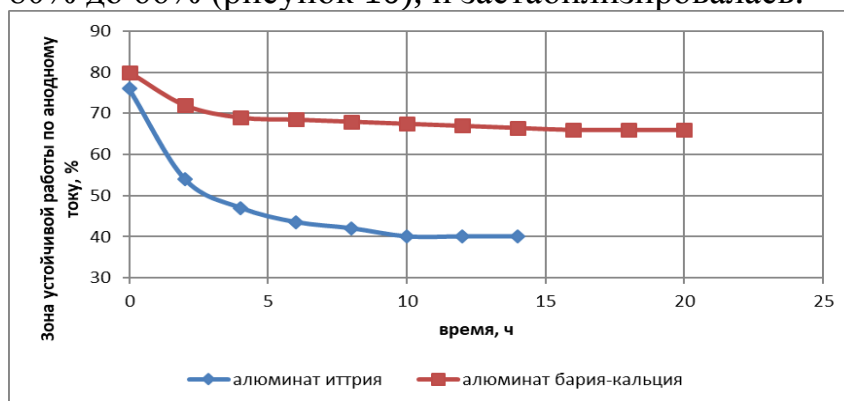


Рисунок 10 – Зависимость зоны устойчивой работы амплитрона по анодному току от времени наработки и эмиссионно-активного материала катода

Опытный амплитрон с разработанным катодом, обеспечивает требуемую зону устойчивой работы по анодному току. При дальнейшем прогоне в 150 часов и испытаний на циклы включения-выключения существенных изменений в работе амплитрона зафиксировано не было.

Для алюминатно-иттриевого катода рассеиваемая мощность увеличилась до 1700 Вт, а температура эмиттерной втулки до 1050°C, что снижает долговечность опытного амплитрона до 15 часов.

Опытный амплитрон с алюминатно-иттриевым катодом, в состав которого входит присадка оксида магния, имеет ток срыва на третью зону в среднем на 13% ниже, чем макет с катодом без присадки. Таким образом, металлокерамический алюминатно-иттриевый катод с присадкой оксида магния обладает более высоким КВЭЭ по сравнению с алюминатно-иттриевым катодом без присадки. Для подтверждения долговечности работы опытного амплитрона с алюминатно-иттриевым катодом, содержащим оксид магния провели прогон в 100 часов, с проведением контрольных измерений параметров каждые 5 часов. После 25 часов работы опытного амплитрона стало наблюдаться снижение КВЭЭ по косвенным признакам изменения рабочих параметров прибора, таких как: увеличение пульсации импульса, увеличение длительности спада импульса, снижение зоны устойчивой работы по анодному току, увеличение тока срыва на третью зону. Через 35 часов после начала прогона вышеприведенные значения

параметров превысили значения параметров опытного амплитрона с алюминатно-иттриевым катодом без присадки оксида магния. Еще через 5 часов работы значения указанных параметров вышли за пределы технических требований на данный амплитрон и прогон прекратили.

При детальном изучении внутренних поверхностей анода и полюсных наконечников, на медных поверхностях был обнаружен металлический налет серого цвета, содержащим в своем составе оксид магния. Применение присадки оксида магния в эмиссионно-активном материале катода для повышения его КВЭЭ не эффективно вследствие его быстрого испарения с поверхности катода и запыления рабочей части анода амплитрона. Дальнейшие работы в этом направлении прекратили.

В результате испытаний на ВУМ опытного амплитрона, с катодом данной конструкции, изготовленным с применением алюмината иттрия, после десяти часов работы амплитрона зона устойчивой работы по анодному току снизилась с 76% до 40%, что не обеспечивает производственных запасов данного амплитрона.

Для подтверждения долговечности и безотказности амплитрона с целью сокращения длительности и трудоемкости динамических испытаний, была разработана методика ускоренных испытаний. Настоящая методика распространяется на амплитрон, с катодом, разработанным в процессе выполнения настоящей работы.

Основным фактором, ограничивающим надежность мощных импульсных амплитронов, является процесс разрушения теплонагруженных электродов за счет процесса эрозии из-за интенсивной бомбардировки их рабочих поверхностей мощным электронным потоком. В соответствии с анализом литературных данных и опыта производства амплитронов наиболее уязвимым, с точки зрения надежности, теплонагруженным электродом является катод.

Предельно допустимая температура электродов в импульсном режиме значительно ниже, чем в непрерывном режиме. Она определяется не скоростью испарения материала, а скоростью накопления неоднородностей внутри материала катода. Увеличение количества неоднородностей приводит к разрушению материала катода. Амплитрон выводит из строя не механическое разрушение поверхности слоя материала эмиттера, не выпадение частиц из этого слоя, а резкое возрастание температуры частиц, отделенных трещинами от основного материала катода, вызывающее бурное испарение этих частиц.

Ускоренные испытания на безотказность предусматривают форсирование режима испытаний за счет увеличения удельной импульсной нагрузки на электроды амплитрона, установленного в данной методике, приводящего к интенсификации физико-химических процессов без изменения основных механизмов отказов.

Интенсивность процесса бомбардировки поверхностей электродов амплитрона описывается параметром импульсной тепловой нагрузки $P \cdot \sqrt{\tau}$,

где: P - удельная импульсная мощность тепловых нагрузок, Вт/см²;
 τ - длительность импульса, сек. Увеличение параметра $P \cdot \sqrt{\tau}$ при ускоренных испытаниях достигается путем увеличения удельной мощности тепловой нагрузки P на катод амплитрона за счет повышения тока анода на 20% относительно его номинального значения.

Амплитрон считают выдержавшим испытания, если в процессе и после испытания электрические параметры-критерии годности соответствуют нормам, установленным техническим заданием на амплитрон.

По разработанной методике были проведены динамические испытания опытного амплитрона и подтверждены его безотказность и долговечность не менее 6000 часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан вторично-эмиссионный металлокерамический импрегнированный катод, устойчивый к термомеханическим нагрузкам с коэффициентом вторичной электронной эмиссии не ниже 2,6 в диапазоне энергий первичных электронов 500-700 эВ, для мощных импульсных амплитронов С-диапазона частот с мгновенной готовностью и долговечностью не менее 6000 часов.

Основные выводы по работе:

1 Моделирование тепловых процессов в катоде в сочетании с экспериментальным калориметрическим методом позволяет определить температуру эмиссионных втулок и обеспечить заданную долговечность катода. Для металлокерамического катода диаметром 18 мм с пропиткой вольфрамовой матрицы пористостью 25-28% эмиссионно-активным материалом состава $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ от 7,5 до 8% по массе при температуре 1750°С обеспечивает мгновенную готовность прибора, коэффициент вторичной электронной эмиссии не ниже 2,6 и долговечность не менее 6000 часов при рабочей температуре катода 800-830°С.

2 Применение водяного охлаждения позволяет регулировать температуру катода за счет изменения термического сопротивления. Отводимая мощность в этом случае ограничивается коэффициентом теплоотдачи между внутренней поверхностью катода и теплоносителем ($\alpha < 3 \cdot 10^4$ Вт/см²·К), а так же температурой внутренней поверхности 100°С. Предельная отводимая мощность для разрабатываемого катода составляет 120 Вт/см². Предельная отводимая мощность без водяного охлаждения определяется теплоотводом по катодной ножке и ограничивается предельной температурой катода 1100°С. Долговечность катода при такой температуре не превышает 500 часов.

3. Пропитка матрицы алюминатом иттрия требует рабочих температур катода более 1000°С, что ограничивает долговечность прибора не более 100 часов. Пропитка алюминатом иттрия с присадкой оксида магния (10-11% по массе) ограничивает долговечность прибора до 25 часов, вследствие интенсивного испарения оксида магния.

4. Разработана и применена методика оценки безотказности амплитрона, которая в отличие от существующих методик устанавливает методы ускоренной оценки безотказности при проведении кратковременных испытаний на безотказность, за счет форсирования режима испытаний учитывающего процесс разрушения теплонагруженных электродов. Ввиду относительной простоты и приемлемой точности получаемых результатов данная методика может быть использована при разработке перспективных вторично-эмиссионных катодов для амплитронов.

5. Вторично-эмиссионный металлокерамический катод, разработанный в ходе выполнения диссертационной работы, а так же разработанная технология получения эмиссионно-активного материала, технология изготовления и конструкция катодного узла внедрены в производство мощных импульсных амплитронов, являющихся выходными каскадами комплексированных СВЧ усилителей, изготавливаемых в Научно-Производственном центре мощной высоковольтной СВЧ аппаратуры и её компонентов АО «Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца» (АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“»)

(Акт внедрения результатов диссертационной работы ведущего технолога отдела разработки мощной высоковольтной СВЧ аппаратуры и ее компонентов АО РТИ НПЦ-5).

6. Результаты кандидатской диссертации использованы при проведении учебного процесса по направлению 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника» в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А.

(Акт об использовании результатов кандидатской диссертации Тищенко А.А. «Вторично-эмиссионный металлокерамический импрегнированный катод для мощных импульсных амплитронов СВЧ-диапазона с повышенной долговечностью» в учебном процессе).

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. Тищенко А. А. Регулирование рабочей температуры вторично-эмиссионного катода [Текст] / А. А. Тищенко, А. С. Мясников, А. Я. Зоркин, О. Д. Тищенко, Е.Н. Горбунова // Электроника: Наука, технология, бизнес. - 2022. - № 8 (219). – С. 82-84.

2. Тищенко А. А. Выбор и обоснование материала керна вторично-эмиссионного катода [Текст] / А. А. Тищенко, А. С. Мясников, А. Я. Зоркин, О. Д. Тищенко, Е.Н. Горбунова // Электроника: Наука, технология, бизнес. - 2022. - № 9 (220). – С. 98-101.

Статьи в изданиях, включенных в международные базы цитирования

3. Тищенко, А.А. Металлокерамические и металлосплавные катоды в мощных амплитронах / А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин, А.С. Мясников, О.Д. Тищенко, М.А. Приходько // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 22-23 сент. 2016 г. = 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2016): Conference

Патенты

4. Пат. на полезную модель RU 176929, МПК H01J 9/12. Вторично-эмиссионный катод / А.А. Тищенко, А.С. Мясников, О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин; опубл. 02.02.2018, Бюл. № 4. – 4 с.

5. Пат. на полезную модель RU 182187, МПК H01J 19/02, H01J 1/14, H01J 9/02. Импрегнированный катод / О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин; опубл. 09.01.2018, Бюл. № 22. – 3 с.

6. Пат. на полезную модель RU 189456, МПК H01J 9/12, H01J 1/32. Вторичноэмиссионный катод / А.Я. Зоркин, С.В. Семенов, Н.А. Вавилина, О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин; опубл. 23.05.2019, Бюл. № 15. – 4 с.

7. Пат. на полезную модель RU 211839, МПК H01J 9/12. Вторично-эмиссионный катод / А.Я. Зоркин, О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, Н.А. Вавилина; опубл. 28.02.2022, Бюл. № 4. – 3 с.

Статьи в других журналах и сборниках трудов научных конференций

8. Тищенко, А.А. Исследования вторично-эмиссионных свойств катодов электровакуумных приборов [Текст] / О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин // Вопросы электротехнологии. – 2018. – № 1 (18). – С. 63-66.

9. Тищенко, О.Д. Формирование характеристик импрегнированных катодов приборов М-типа с мгновенной готовностью на основе совершенствования электротехнологических процессов [Текст] / О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, А.А. Тищенко, Е.Н. Горбунова // Вопросы электротехнологии. – 2019. – № 4 (25). – С. 81-90.

10. Тищенко, А.А. Вторично-эмиссионный катод с водяным охлаждением [Текст] / А.А. Тищенко, А.С. Мясников, О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 3 [Электронный журнал] URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/2/text.pdf>

11. Тищенко, А.А. Высокотемпературные композиционные катодные материалы на основе оксидов иттрия [Текст] / И.Р. Демидов, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин// Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. Доклады VIII Международной конференции. Саратов, 2019. С. 209-212.

12. Тищенко, А.А. Металлопористый катод вакуумного электронного прибора магнетронного типа с повышенной долговечностью и мгновенной готовностью [Текст] / О.Д. Тищенко, С.В. Семенов, А.Я. Зоркин, А.А. Тищенко, И.В. Родионов, И.В. Белова // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 3 [Электронный журнал]. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42096>

13. Тищенко, А.А. Исследования химического и фазового состава эмиссионно-активного вещества импрегнированного катода маломощного прибора магнетронного типа [Текст] / О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 4 (17). – С. 76-80.

14. Тищенко, А.А. Формирование эмиссионных характеристик комбинированных катодов для приборов магнетронного типа с мгновенной

готовностью [Текст] / О.Д. Тищенко, А.Д. Рожков, А.Я. Зоркин, А.А. Тищенко // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2017. – С. 285-293.

15. Тищенко, А.А. Причины брака по вытеканию стеклофазы на поверхность комбинированного катода маломощного усилителя прямой волны М-типа [Текст] / О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, И.В. Белова, // Вопросы электротехнологии. - 2017. – №1(14).– С. 103-106.

16. Тищенко, А.А. Технология изготовления импрегнированных катодов для усилителей прямой волны М-типа с пониженной входной мощностью [Текст] / О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, А.А. Тищенко // Вопросы электротехнологии. – 2016. – № 1 (10). – С. 116-118.

17. Тищенко, А.А. Формирование кромок автоэмиссионных шайб комбинированного катода маломощного усилителя прямой волны М-типа [Текст] / О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин // Вопросы электротехнологии. – 2016. – № 3 (12).– С. 17-20.

18. Тищенко, А.А. Исследования влияния электротермических процессов на структуру лезвий автоэмиссионных танталовых шайб комбинированных катодов приборов М-типа [Текст] / О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, И.В. Белова, А.Я. Зоркин, Е.Н. Горбунова // Вопросы электротехнологии. 2018. № 4 (21).– С. 92-96.

19. Тищенко, А.А. Влияние присадки оксида магния в металлокерамическом катоде на работу мощного амплитрона [Текст] / А.А. Тищенко, О.Д. Тищенко, А.С. Мясников// Современные материалы, техника и технология. материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор: Горохов А.А., 2014. С. 423-426.

Тищенко Артем Александрович
**ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ
ИМПРЕГНИРОВАННЫЙ КАТОД ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
АМПЛИТРОНОВ С-ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ
ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.01.2023 г. Формат А5. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100. Заказ № 30898.

Издательство «Техно-Декор»,
Саратов, Московская, 160, тел.: 77-08-48
sar-print.ru