

На правах рукописи



УДК: 621.385.69

Жабин Геннадий Анатольевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫХ ОКСИДНЫХ КАТОДОВ
ДЛЯ ЦИКЛОТРОННЫХ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Фрязино – 2022

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»

Научный руководитель: **Галдецкий Анатолий Васильевич**, кандидат физико-математических наук, начальник теоретического отдела АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Официальные оппоненты: **Соминский Геннадий Гиршевич**, доктор физико-математических наук, профессор Высшей Инженерно-Физической Школы ФГАОУ высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Шешин Евгений Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники МФТИ

Ведущая организация: АО «НПП «Торий», г. Москва

Защита диссертации состоится «24» марта 2022 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 по специальности 2.2.1. – Вакуумная и плазменная электроника по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2А.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте http://science.istokmw.ru/wp-content/uploads/2021/12/zhabin_d.pdf.

Автореферат разослан «02» февраля 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 74.1.008.01
кандидат технических наук, доцент



Куликова И. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. На современном этапе развития вакуумной и плазменной электроники повышаются требования к электровакуумным приборам сверхвысоких частот (ЭВП СВЧ), в том числе к циклотронным защитным устройствам (ЦЗУ), связанные с необходимостью уменьшения массогабаритных параметров, снижения шумов, увеличением надёжности и срока службы. Преимуществом ЦЗУ перед другими типами защитных устройств является сверхмалое время восстановления их чувствительности после воздействия СВЧ-перегрузки, что обеспечивает их успешное применение в радиолокационных станциях (РЛС) с высокой частотой повторения импульсов и длительностью импульсов от единиц наносекунд до миллисекунд.

Важнейшим функциональным узлом циклотронного защитного устройства является катодно-подогревательный узел с молекулярно-напыленным оксидным катодом (МНОК).

Оксидные катоды (ОК) до настоящего времени остаются наиболее распространенными и востребованными эмиттерами в ЭВП СВЧ при плотности тока менее $\sim 0,3$ А/см² в непрерывном режиме и долговечности более 10000 часов.

МНОК, являясь одним из типов ОК, в настоящее время эффективно применяется в ЦЗУ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн при рабочей температуре не выше 650 °С.

Большой вклад в исследование термоэмиссионных катодов внесли зарубежные и отечественные ученые: Г. Герман, С. Вагнер, Дж. Метсон, Л. Спроул, П. Зальм, Г. Гартнер, Б. М. Царев, Б. П. Никонов, Б. Ч. Дюбуа, О. В. Поливникова, А. Б. Киселев, Ю. А. Кондрашенков, А. Я. Князев, А. М. Соколов, В. А. Смирнов, О. Ю. Масленников, И. П. Ли, В. И. Капустин и многие другие.

Несмотря на достаточно большое количество теоретических и экспериментальных работ, связанных с исследованием МНОК, ряд задач на момент постановки диссертационной работы оставался малоизученным.

Так, например, продвижение в область мм-диапазона, потребовало миниатюризации катодно-подогревательного узла (КПУ), а также уменьшения ширины эмиссионной зоны ленточных МНОК с 30 мкм до 18 – 20 мкм при одновременном увеличении долговечности до 10000 часов с плотностью тока до 2 – 3 А/см². Кроме того, потребовались дальнейшие исследования по возможности применения в ЦЗУ МНОК с тонким эмиссионным покрытием 0,8 – 1 мкм, обеспечивающих лучшие эмиссионные свойства.

Проведение необходимых научно-технических работ должно включать в себя как физико-химические методы исследования структуры эмиссионной поверхности, так и совершенствование существующих технологий изготовления, и разработку новых конструкций термоэлектронных катодов.

Помимо этого, процесс изготовления МНОК с керном микронных размеров и толщиной покрытия менее 1 мкм потребовал дальнейших исследований физико-химических процессов в эмиссионном слое, на границе с керном, а также разработки технологий, улучшающих эмиссионные и эксплуатационные

параметры катодов. В последнее время МНОК с именно такими характеристиками находят наибольшее применение при создании новых поколений ЦЗУ.

С учетом отмеченных требований разработка МНОК с повышенной плотностью отбора тока при низкой температуре, повышенной стабильностью тока и увеличенной долговечностью МНОК в ЦЗУ при малой толщине эмиссионного покрытия, является **актуальной задачей**.

Целью диссертационной работы является исследование физико-химических свойств, состава, структуры и морфологии эмиссионной поверхности МНОК с толщиной покрытия 0,8 – 1 мкм, оптимизация режимов осаждения, а также разработка новых конструкций катодов с улучшенными эмиссионными и эксплуатационными параметрами для ЦЗУ, а основной **научной проблемой** – повышение плотности тока, стабильности эмиссионных параметров и долговечности низкотемпературных тонкопленочных термоэмиссионных миниатюрных катодов вакуумных СВЧ-приборов сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технические задачи:

1. Исследование влияния на характеристики МНОК: повторного высокотемпературного отжига в водороде керна с пленкой иридия на эмиссионные свойства МНОК; технологических параметров ионно-плазменного напыления на микроструктуру, фазовый состав и эмиссионные свойства МНОК; отбора тока повышенной плотности на элементный состав и долговечность МНОК; воздействия СВЧ-мощности в резонаторе ЦЗУ на стабилизацию эмиссионного тока МНОК.

2. Разработка конструкций МНОК с повышенной механической устойчивостью и улучшенными эмиссионными и эксплуатационными параметрами для ЦЗУ.

3. Разработка промышленной технологии изготовления МНОК, обеспечивающей повышение стабильности эмиссионных параметров, надежности и долговечности работы МНОК в ЦЗУ.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими результатами:

1. Введение в технологию изготовления МНОК повторного отжига в водороде керна с пленкой иридия при температуре 1050 °С обеспечило возможность снижения на 40 – 80°С рабочей температуры МНОК и повысило срок его службы.

2. Исследован механизм воздействия высокого уровня СВЧ-мощности на входе ЦЗУ на стабилизацию тока эмиссии МНОК. Показано, что при воздействии СВЧ-мощности во входном резонаторе ЦЗУ происходит очистка электронным пучком поверхности резонатора от сорбированных атомов, что приводит к последующему уменьшению флуктуаций тока МНОК во время эксплуатации с 4 – 10 % до 1 – 3 %.

3. Совершенствование технологических режимов изготовления МНОК позволило в экспериментальных макетах ЦЗУ получить с катодов ток плотностью

более 10 A/cm^2 в непрерывном режиме при долговечности более 1400 часов.

4. Разработаны и исследованы новые конструкции МНОК, изготовленных с помощью лазерной микрообработки, которые имеют повышенную жесткость и виброустойчивость, что обеспечило понижение уровня паразитных компонент выходного сигнала в ЦЗУ на 25 – 30 дБ.

Научная значимость работы состоит в том, что представленные результаты, научные положения и выводы диссертации, полученные при исследовании и разработке новых технологий и конструкций МНОК раскрывают детали химического состава активного слоя МНОК и параметров диффузии атомов металлов при высоких температурах. Указанные исследования способствуют выявлению новых знаний в области вакуумной и плазменной электроники и служат базой для проектирования миниатюрных эффективных источников электронов для использования в аппаратуре применения гражданской и военной техники.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых технических решений, улучшающих эмиссионные и эксплуатационные характеристики МНОК в ЦЗУ:

1. Рабочая температура разработанных МНОК уменьшена на $40 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$, что привело к увеличению долговечности и ресурса работы катодов в ЦЗУ в 1,5 – 2 раза.

2. Найдены режимы осаждения (состава газа, давления, температуры мишени и катодов), обеспечившие повышение повторяемости эмиссионных свойств МНОК в ЦЗУ.

3. Разработана промышленная технология изготовления катодов с нанесением эмиссионного покрытия МНОК толщиной $0,8 - 1 \text{ мкм}$ в едином вакуумном цикле напыления, обеспечившая долговечность работы катодов в ЦЗУ до 7000 – 10000 часов в непрерывном режиме при плотности тока $2 - 3 \text{ A/cm}^2$ и до 16000 часов при плотности тока $1,5 - 2 \text{ A/cm}^2$.

4. Полученное в макетах ЦЗУ значение плотности тока катода более 10 A/cm^2 в непрерывном режиме при долговечности более 1400 часов позволяет применять МНОК в других электровакуумных приборах.

5. Результаты исследований и разработки новых конструкций МНОК из вольфрамиевой фольги внедрены в производственный процесс изготовления ЦЗУ с улучшенными эмиссионными и эксплуатационными характеристиками в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В диссертационную работу вошел цикл теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в период с 2014 г. по настоящее время в рамках выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР): «Фрегат», «Штырь-2», «Шлюз-М», «Штамп-2М», «Шпинат» и планов поставок изделий ЦЗУ.

Методы и средства исследований. При выполнении работы применялись известные и специально разработанные методики и аппаратура, использовались основные научные положения эмиссионной и вакуумной электроники, геометрической и физической оптики. Для исследования структуры и свойств материалов использовались следующие методы: рентгеновского спектрального

микроанализа (РСМА) с использованием микроанализатора INCA Penta FETx3 «Oxford Instruments» в качестве приставки к растровому электронному микроскопу (РЭМ) для определения элементного состава эмиссионных покрытий (М-покрытий); ожэ-электронной спектроскопии (ОЭС) на установке «09ИОС-10-005» для исследования элементного состава поверхности. Морфология поверхности исследовалась на РЭМ марки «JEOL», сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) S-3400N Hitachi и атомно-силовом микроскопе (АСМ) марки «АИСТ-НТ». Для исследования фазового состава М-покрытий проводился анализ спектров комбинационного рассеяния (КР) на приборе «Bruker Senterra micro-Raman system». Дифракционные измерения структуры образцов проводились на установках «ДРОН-8» и «ДРОН-6». Измерения толщины М-покрытий осуществлялись микроинтерферометром «МИИ-4». Измерения и исследования проводились при непосредственном участии в экспериментах автора диссертации.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивалась использованием комплекса современных физических и химических методов исследования материалов и образцов пленок, содержащих карбонаты ЦЗМ, воспроизводимостью результатов исследований, соответствием предложенных моделей работы МНОК экспериментальным результатам, полученным с использованием аттестованных методик испытания АО «НПП «Исток», поверенного измерительного оборудования, сопоставимостью полученных результатов с данными других авторов. Проведенные исследования позволили теоретически обосновать и практически реализовать основные **положения и результаты**, полученные автором и **выносимые на защиту**.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Введение в технологию изготовления МНОК повторного отжига в водороде при температуре 1050°С в течение 30 минут вольфрамениевого керна, покрытого иридиевой пленкой толщиной 0,25 – 0,3 мкм, изменяет морфологию пленки, увеличивает содержание в ней активирующей примеси вольфрама до 3 – 4 %, что обеспечивает в ЦЗУ повышение срока службы катода в 1,5 – 2 раза за счет снижения на 40 – 80°С рабочей температуры МНОК.

2. Предложенные параметры ионно-плазменного напыления в едином вакуумном цикле эмиссионного покрытия МНОК толщиной 0,8 – 1 мкм, в температурном диапазоне распыляемой мишени (Ba,Sr,Ca)CO₃ 750 – 780°С, подложки с катодами – не более 260°С, при давлении рабочего газа 0,075 – 0,13 Па, обеспечивают получение в ЦЗУ тока катода плотностью 2 – 3 А/см² в непрерывном режиме и повышение срока службы до 7 – 10 тыс. часов.

3. Очистка внутренней поверхности входного резонатора ЦЗУ подачей на него СВЧ-мощности 4 – 10 Вт в течение 1 – 3 часов приводит к уменьшению флуктуаций тока МНОК во время эксплуатации с 4 – 10 % до 1 – 3 %, при этом скорость восстановления эмиссии в период такого воздействия возрастает с увеличением рабочей температуры катода.

4. Применение лазерной прецизионной микрообработки при изготовлении подогревателя в форме меандра из фольги сплава ВР-27 ВП толщиной 50 мкм с уменьшенными размерами обеспечивает понижение уровня паразитных

компонент выходного сигнала в ЦЗУ на 25 – 30 дБ, за счет улучшения механической устойчивости катода.

Личный вклад автора заключался в формулировке целей и постановке задач исследований, выполнении большей части экспериментов, анализе и интерпретации их результатов, подготовке научных публикаций и докладов по результатам проведенных исследований. Автором усовершенствована технология изготовления МНОК и проведены исследования эмиссионных свойств. При непосредственном участии автора исследовано влияния параметров осаждения на микроструктуру, состав и эмиссионные свойства МНОК. Совместно с соавторами исследовано распределение элементов и фазового состава МНОК, разработаны конструкции и изготовлены образцы МНОК для испытания в ЦЗУ.

Апробация работы: Работа выполнена в соответствии с планами работ АО «НПП «Исток» в период 2014–2021 г.г. ЦЗУ с МНОК, изготовленными с разной площадью эмиссионной поверхности на основе усовершенствованной технологии осаждения покрытий и применения лазерной микрообработки, прошли успешные испытания на поверенных специализированных стендах.

Результаты работы докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях: VI, VII и VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017–2019 г.); международная научно-техническая конференция «INTERMATIC» (Москва, 2017 г.); XXVII, XXVIII и XXIX Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо (Севастополь, 2017–2019 г.); научно-техническая конференция АО «НПП «Исток»» (Фрязино, 2018 г.); научно-техническая конференция АО «НПП «Торий» (Москва, 2019 г.), и получили одобрение ведущих специалистов отрасли.

Соответствие паспорта научной специальности. Область исследования соответствует паспорту специальности 2.2.1. – «Вакуумная и плазменная электроника».

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 21 печатная работа, в том числе 11 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ (одна без соавторов), 3 статьи в научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Web of Science (3) и Scopus (3).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов, и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая список литературы из 103 наименований, 17 таблиц и 64 рисунков.

Основное содержание диссертационной работы.

Во введении рассмотрены вопросы, касающиеся ОК и МНОК, а также особенности их исследования и применения в ЦЗУ. Обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обоснована научная новизна полученных результатов, практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту. Для решения проблемы повышения стабильности тока, качества и долговечности МНОК в ЦЗУ предложено

исследование состава ядра, М-покрытия, а также влияние повышенного отбора тока, воздействия СВЧ-мощности и конструкции катода на эмиссионные и эксплуатационные свойства.

В первой главе представлен литературный обзор, связанный с темой диссертации, а также современное состояние технологии ОК. Рассмотрены методики исследования физико-химических и эмиссионных свойств и вопросы совершенствования технологии МНОК для применения в ЦЗУ. Показаны преимущества МНОК перед ОК и проблемы, возникающие при использовании МНОК с тонким покрытием. Сделаны выводы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлены исследования фазового и элементного состава, а также морфологии эмиссионной поверхности МНОК. Приведены результаты исследования влияния высокотемпературного отжига ядра в водороде на состав поверхности и эмиссионные свойства МНОК, показана возможность отбора тока повышенной плотности с МНОК и его влияние на состав поверхности. Представлены результаты испытаний на долговечность при различных режимах работы катода.

Исследование влияния отжига в водороде ядра с пленкой иридия толщиной 0,25–0,3 мкм на состав поверхности и эмиссионные свойства МНОК проводилось для двух партий катодов и образцов в виде пластин ВР-27ВП, предварительно химически очищенных от органических загрязнителей. В первой партии после нанесения иридия отжиг не проводился, во второй – осуществлялся отжиг в водороде при 1050°C 30 минут с точкой росы не выше –60°C. Дифракционные измерения структуры образцов проводились на установке ДРОН-8. Оже-анализ поверхности Ir проводился при комнатной температуре с использованием первичного пучка электронов с энергией 3 кэВ и диаметром около 20 мкм.

На рисунках 1 и 2 показаны концентрации примесей образцов покрытых иридием, до и после отжига, полученные из оже-спектров.

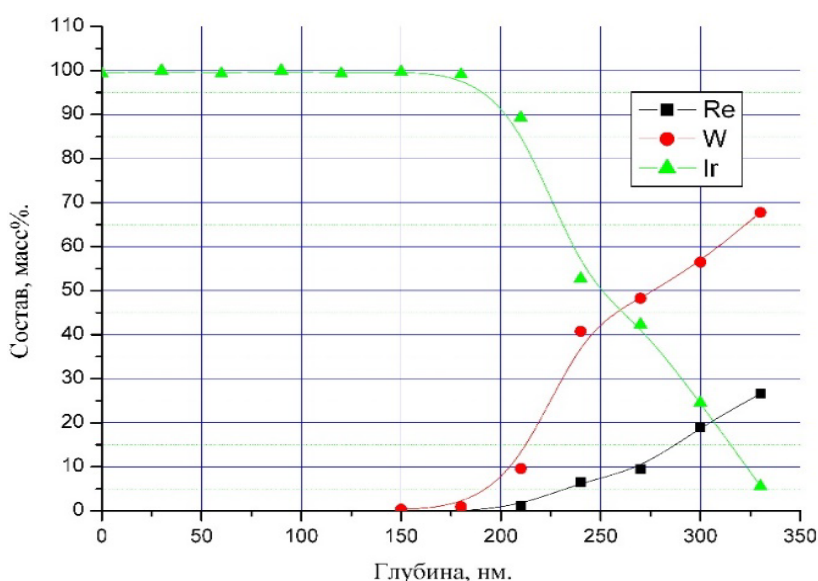


Рисунок 1. Профили концентраций примесей образцов сплава ВР-27ВП, покрытых пленкой иридия, до отжига

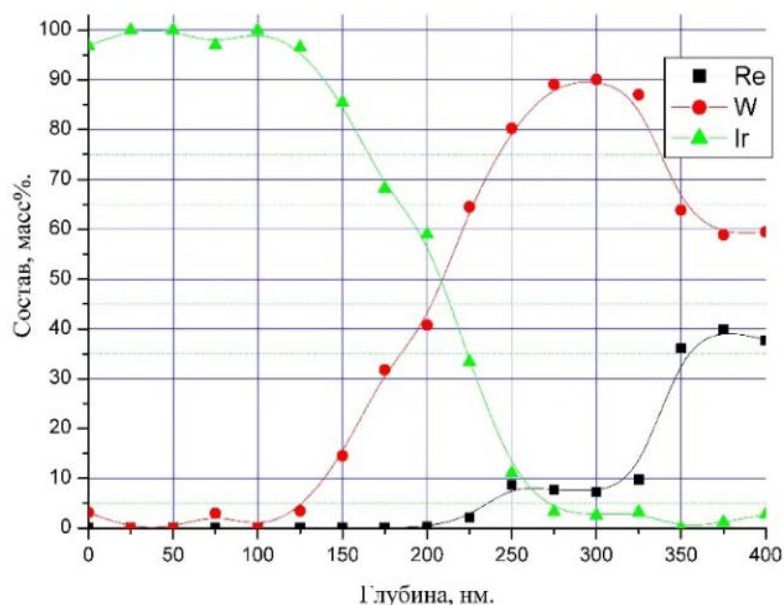


Рисунок 2. Профили концентраций примесей образцов сплава ВР-27ВП, покрытых пленкой иридия, после отжига

Анализ графиков распределения примесей и рентгеновской дифрактометрии образцов с пленкой Ir показал, что после отжига в результате диффузии атомов изменился состав поверхности. В сплаве ВР-27ВП произошло выделение фазы рения. Концентрация W на поверхности Ir после отжига составила 3 – 4 масс. %, концентрация атомов Re – 0,5 – 1 масс. %. После отжига поверхность пленки иридия изменила морфологию, появились поры диаметром 100 – 250 нм.

Методом ионно-плазменного напыления в атмосфере аргона и CO₂ на покрытые иридием керны катодов с отжигом и без отжига осаждалось эмиссионное покрытие из мишени (Ba,Sr,Ca)CO₃ с составом щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) соответственно 47, 45 и 8 %.

На рисунке 3 показаны эмиссионные характеристики МНОК с отжигом и без отжига.

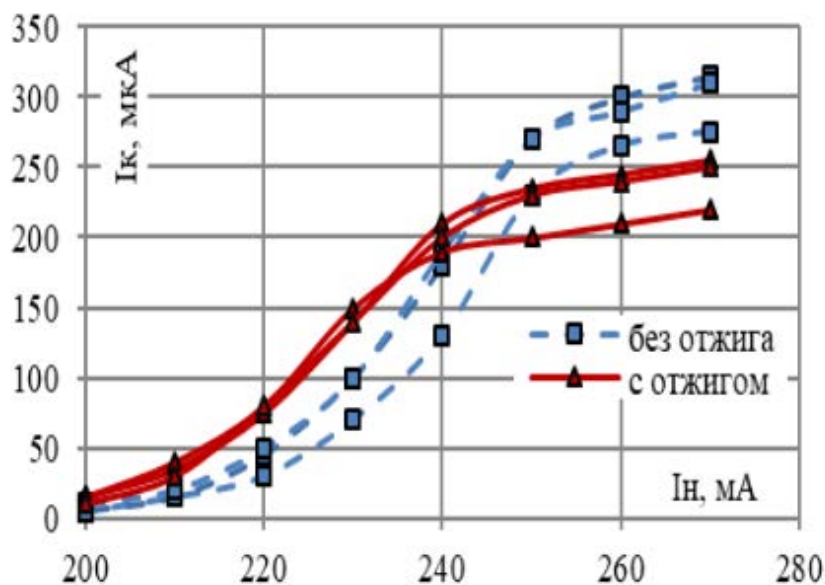


Рисунок 3. Невольтные характеристики МНОК: сплошные – с отжигом; пунктирные – без отжига

Анализ рисунка 3 показал, что рабочие точки недокальных характеристик катодов с пленкой иридия без отжига составили 260 мА, что соответствует температуре 600 – 620°C, а для катодов с отжигом – 245 – 250 мА (540 – 560°C). Разность рабочих температур катодов с отжигом и без отжига составила 40 – 80°C.

Проведенные исследования процессов влияния отжига керна с пленкой иридия на эмиссионные свойства катодов, позволили сформулировать первое научное положение:

Введение в технологию изготовления МНОК повторного отжига в водороде при температуре 1050°C в течение 30 минут вольфрамениевого керна, покрытого иридиевой пленкой толщиной 0,25 – 0,3 мкм, изменяет морфологию пленки, увеличивает содержание в ней активирующей примеси вольфрама до 3 – 4 %, что обеспечивает в ЦЗУ повышение срока службы катода в 1,5 – 2 раза за счет снижения на 40 – 80°C рабочей температуры МНОК.

Проведены исследования влияния морфологии поверхности и ее состава на эмиссионные свойства МНОК. Используя энергодисперсионную приставку Thermo к СЭМ S-3400N Hitachi, исследован состав покрытий на 2-х пластинах кремния №№ 16, 16S, расположенных на различных радиальных расстояниях от центра подложки. В покрытии на образце № 16 отношение (ат. %) Ва/С и Ва/О составляло 0,37 и 0,16 соответственно, а на образце № 16S – 0,61 и 0,20 соответственно. При увеличении радиального расстояния количество трещин в М-покрытии уменьшилось, содержание атомов углерода возросло, а эмиссионные свойства МНОК улучшились (рисунок 4).

Исследовалась возможность отбора тока повышенной плотности с МНОК в ЦЗУ. На рисунке 5 представлены недокальные характеристики МНОК с толщиной покрытия 0,8 мкм и эмиссионной площадью $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$.

Достигнутая долговечность составила более 1400 часов при плотности тока 10 А/см². Результаты исследования с применением ОЭС показали, что в процессе отбора тока с МНОК, наряду с испарением активных элементов М-покрытия (Ва и Sr), они мигрируют на керне по направлению от границы покрытия к подогревателю на расстояние 150 – 200 мкм.

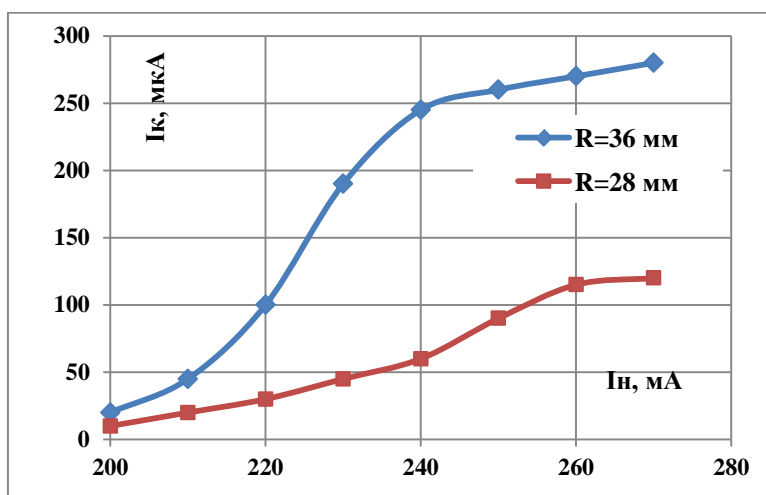


Рисунок 4. Недокальные характеристики МНОК в зависимости от радиального расстояния R

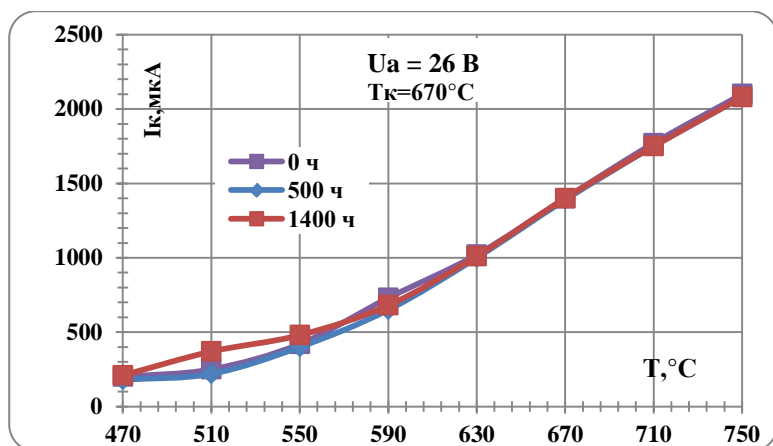


Рисунок 5. Недокальные характеристики МНОК с толщиной покрытия 0,8 мкм

Легирование М-покрытия при напылении МНОК микропримесями Ni и Fe – 0,1 – 0,2 масс. %, позволило увеличить его ток и долговечность (рисунок 6).

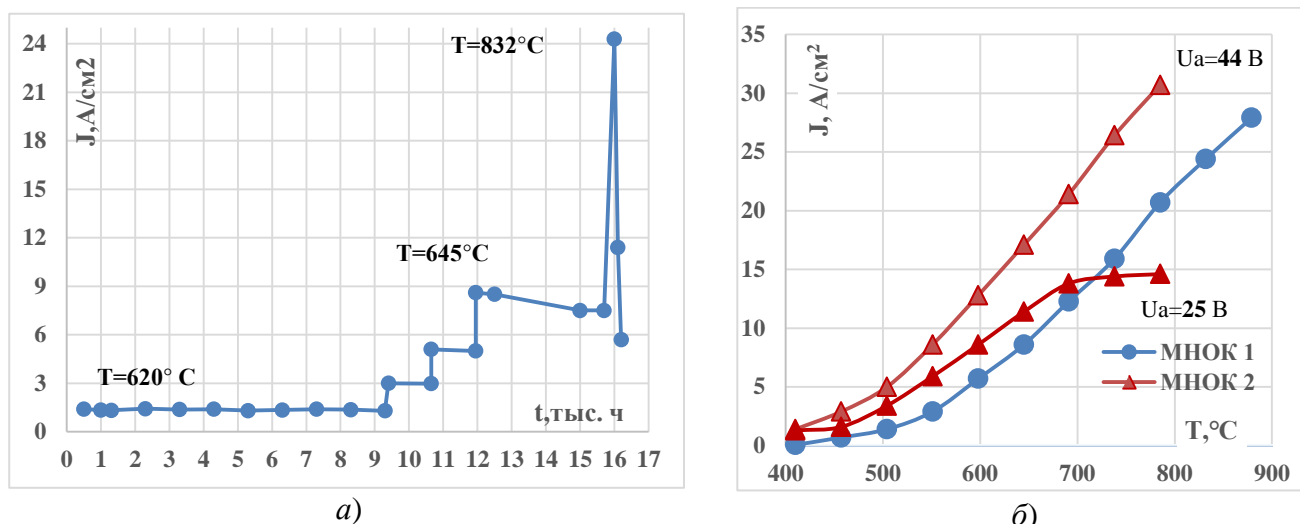


Рисунок 6. Срок службы МНОК 1 (а); эмиссионные характеристики МНОК 1, 2 (б)

При толщине покрытия 0,8 – 1 мкм, плотности тока 1,5 – 2 А/см² и рабочей температуре до 650 °С, была достигнута долговечность МНОК в ЦЗУ 12 – 16 тыс. часов. При давлении в ЦЗУ на уровне 10⁻⁸ – 10⁻⁹ мм рт. ст. и температуре МНОК 645 – 650 °С, достигнута плотность тока 18 А/см² с долговечностью более 1300 часов. Отбор плотности тока более 24 А/см² при температуре 830 – 850 °С сократил время работы МНОК до 200 часов из-за интенсивного испарения Ва и появления трещин в М-покрытии.

В третьей главе исследовано влияния режимов осаждения М-покрытий и воздействия СВЧ-мощности во входном резонаторе ЦЗУ на эмиссионные свойства МНОК. Сравнительный анализ исследований поверхности трех образцов М-покрытий и их поперечных сколов методами АСМ и РЭМ (рисунки 7, 8) показал, что изменение давления газа оказывало влияние на морфологию и микроструктуру. Так, поверхность образца № 1 (рисунок 7а) являлась более шероховатой, по сравнению с образцом № 2 (рисунок 7б), при этом поперечный скол образца № 1 имел «столбчатую» структуру (рисунок 8а), образца № 2

(рисунок 8б)– «переходную», а наиболее плотным являлось покрытие образца № 3 (рисунки 7в,8в).

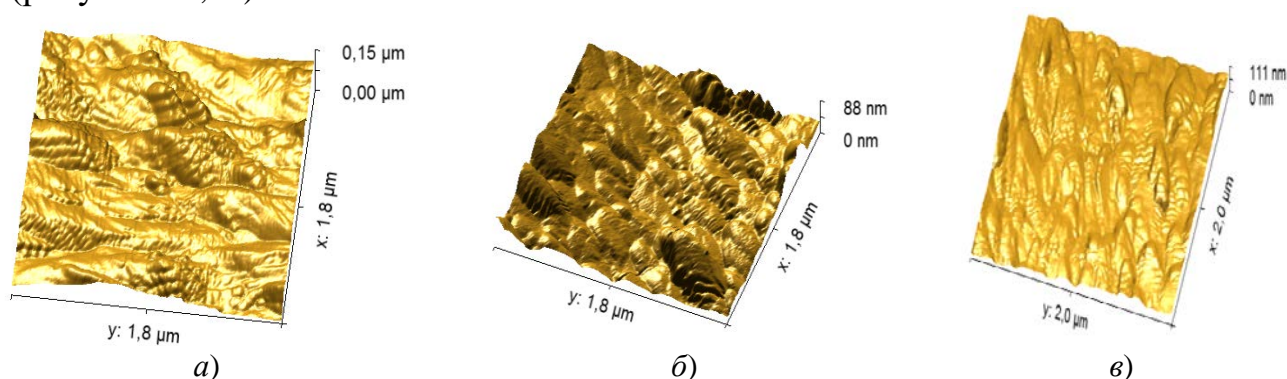


Рисунок 7. АСМ-изображения поверхностей эмиссионных покрытий на подложке Si при давлении газа: Xe/CO₂ – 0,11 – 0,13 Па (а); Ar/CO₂ – 0,1 Па (б); Xe/CO₂ – 0,075 – 0,08Па (в)

Получены результаты о размере зерен (Q) и среднеквадратичной шероховатости (Rq) М-покрытий в зависимости от давления (рисунок 9, а, б), из которых следует, что с уменьшением давления Rq уменьшилась. В таблице 1 представлен состав М-покрытий при различных расстояниях от мишени.

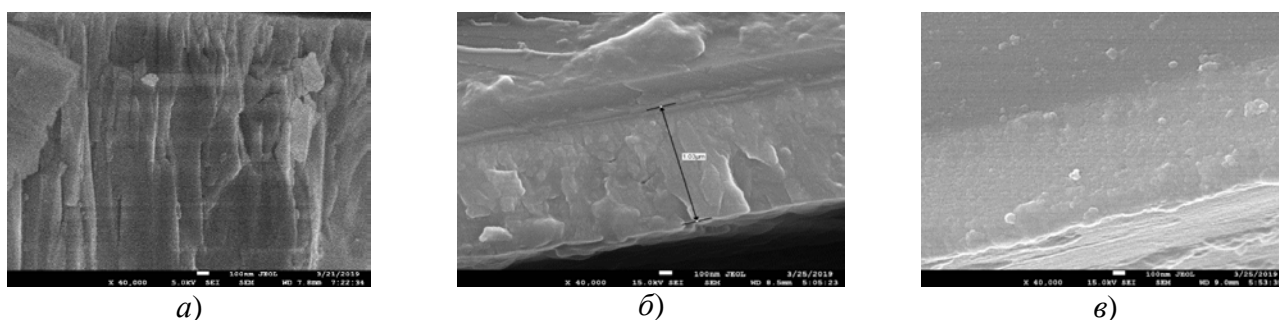


Рисунок 8. РЭМ-изображения поперечного сечения эмиссионных покрытий на подложке VP-27 ВП (а) и Si (б, в); рабочее давление смеси газов Xe/CO₂ – 0,11 – 0,13 Па (а), Ar/CO₂ – 0,1 Па (б), Xe/CO₂ – 0,075 – 0,08 Па (в)

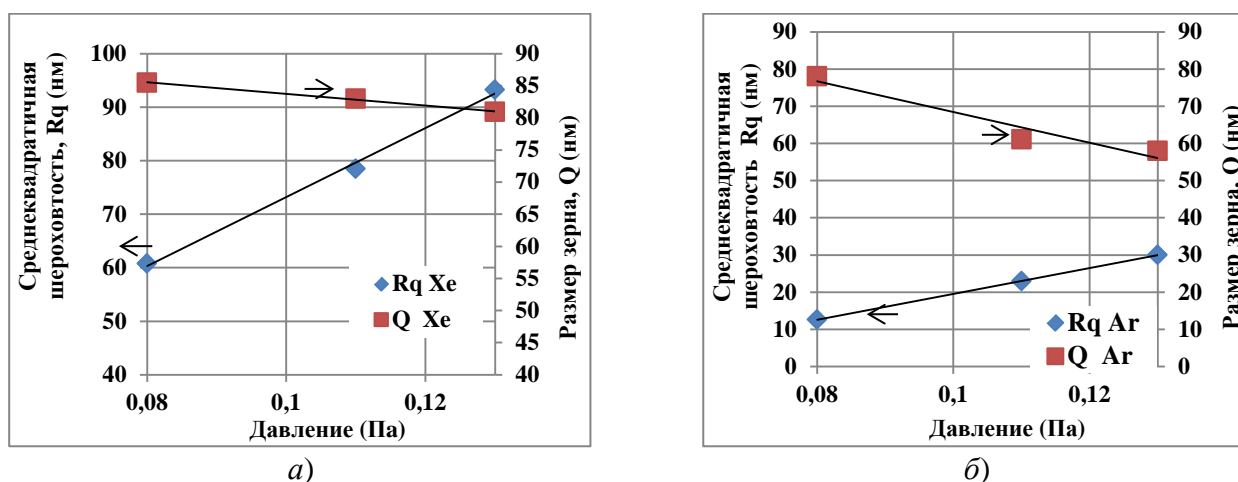


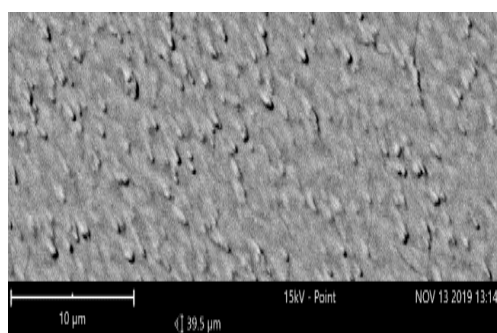
Рисунок 9. Графики изменения шероховатости (R_q) и размера зерен (Q) от давления рабочего газа: Xe/CO₂ (а), Ar/CO₂ (б)

Морфология М-покрытий, расположенных при напылении на расстояниях 20 и 24 мм от мишени представлена на рисунке 10. Анализ результатов показал, что образцы, находившиеся на расстоянии 24 мм от мишени, имели меньше дефектов и более высокое содержание атомов углерода по сравнению с образцами, находившимися на расстоянии 20 мм и продемонстрировали лучшие эмиссионные свойства.

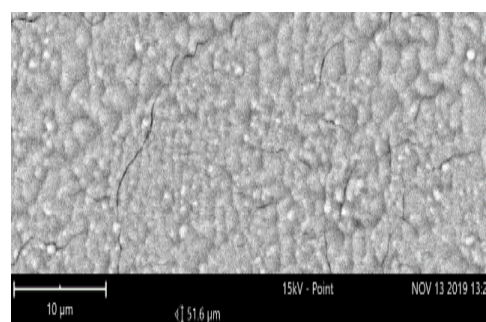
Таблица 1

Элементный состав М-покрытий

На расстоянии 24 мм от мишени			На расстоянии 20 мм от мишени		
Элемент	Концентрация ат.%	Концентрация масс.%	Элемент	Концентрация ат.%	Концентрация масс.%
O	81,57	42,29	O	77,56	36,09
Ba	7,45	33,15	Ba	9,17	36,64
Sr	7,76	22,03	Sr	9,56	24,35
Ca	1,41	1,83	Ca	1,98	2,31
C	1,81	0,71	C	1,73	0,60



а)



б)

Рисунок 10. РЭМ-изображение поверхности М-покрытия на расстоянии 24 мм от мишени(а), на расстоянии 20 мм от мишени (б)

Результаты проведенных исследований процессов напыления М-покрытий, полученные во 2-й и 3-й главах, позволили выработать второе положение:

Предложенные параметры ионно-плазменного напыления в едином вакуумном цикле эмиссионного покрытия МНОК толщиной 0,8 – 1 мкм, в температурном диапазоне распыляемой мишени (Ba,Sr,Ca)CO₃ 750 – 780°C, подложки с катодами – не более 260°C, при давлении рабочего газа 0,075 – 0,13 Па, обеспечивают получение в ЦЗУ тока катода плотностью 2 – 3 А/см² в непрерывном режиме и повышение срока службы до 7 – 10 тыс. часов.

Исследовалось влияние времени воздействия СВЧ-мощности на эмиссионные свойства МНОК в ЦЗУ (рисунок 11). Для этого, после тренировки ЦЗУ в течение 50 часов и получения недокальных характеристик, на входной резонатор в рабочем режиме подавалась СВЧ-мощность. Значения токов накала при соответствующих температурах МНОК приведены в таблице 2, а зависимости тока катода от времени воздействия в ЦЗУ – на рисунке 11б.

Анализ рисунка 11 показал, что при воздействии СВЧ-мощности в ЦЗУ происходило падение тока МНОК и постепенное восстановление в течение 1 – 3 часов.

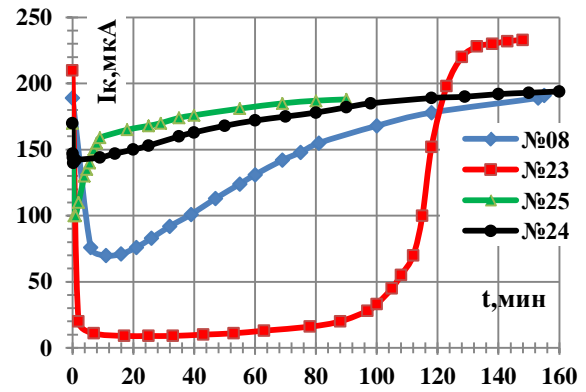
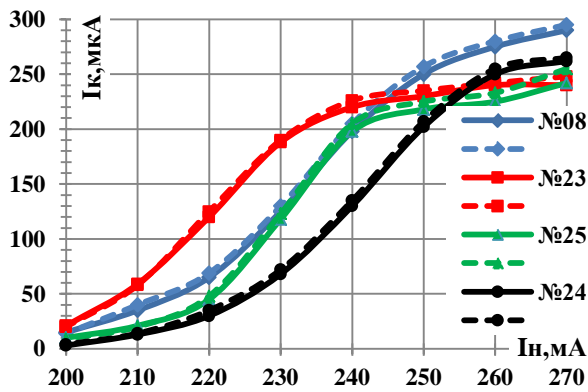


Рисунок 11. Недокальные характеристики (а): сплошные линии – до воздействия СВЧ-мощности, пунктир – после воздействия. Зависимость тока МНОК от времени воздействия СВЧ-мощности (б). 08, 23, 24, 25 – номера ЦЗУ

Таблица 2

Рабочие температуры МНОК

№ ЦЗУ	$I_{н\text{ раб}}, \text{ mA}$	$T_k, ^\circ\text{C}$
08	250	586
23	240	554
25	250	590
24	255	604

На недокальных характеристиках после воздействия СВЧ-мощности заметен сдвиг характеристической точки в низкотемпературную область. В ЦЗУ с МНОК № 4, который после воздействия СВЧ-мощности был поставлен на длительный «прогон», отмечалась стабильность тока (рисунок 12), а долговечность составила более 7000 часов.

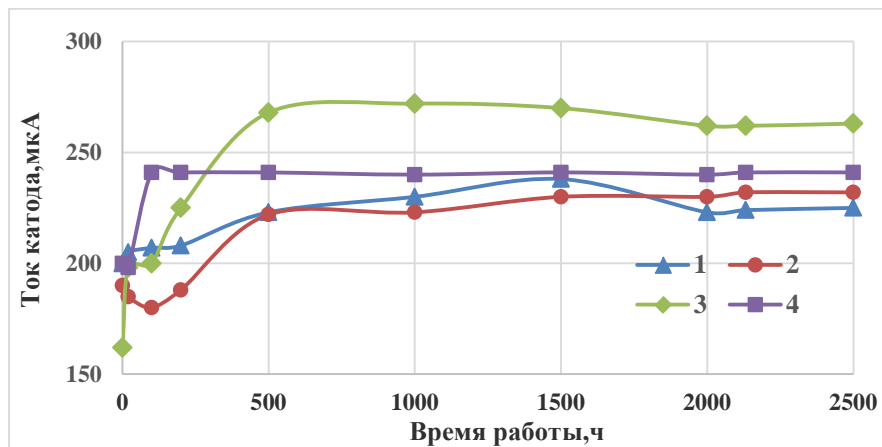


Рисунок 12. Зависимость тока катода ЦЗУ от времени работы: 1 – 3 – без воздействия СВЧ-мощности, 4 – после воздействия СВЧ-мощности

При работе МНОК за счет ухода сорбированных ионов из слоя происходило восстановление барьера на поверхности катода. Анализ таблицы 2 и рисунка 11 показал, что с увеличением рабочей температуры катода скорость восстановления

эмиссии возрастала. Однако для сохранения срока службы температура МНОК в ЦЗУ не должна превышать 650°C. Повторное воздействие повышенной СВЧ-мощностью не приводило к падению тока МНОК.

Дисперсия флуктуаций тока МНОК без воздействия СВЧ-мощности составила 4 – 10 %, с воздействием СВЧ-мощности на входной резонатор 1 – 3 %. Электронная бомбардировка внутренних поверхностей ЦЗУ, при подаче СВЧ-мощности приводила к адсорбции на поверхности МНОК положительных ионов, что вызывало изменение поверхностных доноров и резкое падение эмиссии.

Исследования процессов влияния СВЧ-мощности на десорбцию окислов внутренней оболочки ЦЗУ и эмиссионные свойства катодов позволили сформулировать третье положение:

Очистка внутренней поверхности входного резонатора ЦЗУ подачей на него СВЧ-мощности 4 – 10 Вт в течение 1 – 3 часов приводит к уменьшению флуктуаций тока МНОК во время эксплуатации с 4 – 10 % до 1 – 3 %, при этом скорость восстановления эмиссии в период такого воздействия возрастает с увеличением рабочей температуры катода.

В четвертой главе на основании проведенных исследований описана технология изготовления и особенности применения наносекундного лазера на парах меди (ЛПМ) и фемтосекундного волоконного лазера в изготовлении новых конструкций МНОК, представлены их эмиссионные и эксплуатационные характеристики.

В соответствии с предложенной технологией для обеспечения плоскостности поверхностей после химической обработки, заготовки из 50 мкм фольги сплава ВР-27ВП размером 30 x 40 мм подвергались отжигу в водороде при температуре 850°C в течение 30 минут в специальной оправке. Катодный узел, состоящий из подогревателя в форме меандра и керна, изготавливался на координатном столе автоматической лазерной технологической установки (АЛТУ) «Каравелла-2М».

На рисунке 13 представлены конструкции МНОК изготовленные в виде цельной детали из фольги (а), а также керна из проволоки ВР-20, приваренного лазерной сваркой к изготовленному отдельно подогревателю (б).



Рисунок 13. Изображения МНОК из фольги сплава ВР-27 в виде цельной детали (а) и с лазерной сваркой подогревателя с керном (б). 1 – подогреватель; 2 – керна катода; 3 – термэмиссионное покрытие; 4 – место соединения керна

Следует отметить, что катоды, изготовленные на АЛТУ, в соответствии с разработанной технологией, подвергались химической очистке при условии сохранения структуры поверхности и соответствия размеров чертежу. После технологической операции химической очистки в трихлорэтилене проводилось разрыхление грата с использованием водного раствора кипящей щелочи NaOH. Для финишной очистки использовался раствор перекиси водорода, с последующей промывкой в деионизованной воде с ультразвуком (25 – 30 кГц). Затем катод подвергался отжигу в водороде и, с целью обеспечения формирования в ЦЗУ узкого ленточного электронного луча, толщина керна с помощью прессования уменьшалась до 18 – 20 мкм.

Эмиссионные свойства МНОК исследовались на стенде термоэмиссионной тренировки ЦЗУ по стандартной методике при напряжении анода $U_a = 14$ В, после чего для дополнительной тренировки катода на вход резонатора ЦЗУ в непрерывном режиме подавалась СВЧ-мощность 4 – 10 Вт.

На рисунке 14 представлены фотографии фрагментов катодов, изготовленных из фольги. На поверхностях реза видны участки в виде остывших капель металла (рисунок 14а). Изготовленный из фольги катод после химической очистки и нанесения на керна эмиссионного покрытия представлен на рисунке 14б.



Рисунок 14. Фрагменты катода из фольги ВР-27ВП: после лазерной резки (а), после химической очистки и нанесения М-покрытия на керна (б). Увеличение $\times 100 - 200$

Подогреватель катода, с сечением $0,05 \times 0,04$ мм и общей длиной 5 мм, выполненный из фольги в форме меандра, придавал жесткость конструкции и обеспечивал равномерную теплопередачу керну длиной 1 мм. Общая длина меандра рассчитывалась в зависимости от необходимого сопротивления подогревателя.

На рисунке 15а представлены недокальные характеристики образцов МНОК с подогревателем из вольфрамениевой фольги (1) и из проволоки (2). Анализ недокальных характеристик показал, что характеристическая точка разработанного катода (кривая 1) соответствовала току накала 230 мА, а второго (кривая 2) – 250 мА. Работа выхода для катодов из проволоки и фольги в диапазоне рабочих температур 620 – 650°C, рассчитанная по уравнению Ричардсона при постоянной $A = 120,4 \text{ А К}^{-2}/\text{см}^2$, составила 1,38 и 1,43 эВ соответственно. Катод, изготовленный в соответствии с разработанной промышленной технологией, показал лучшую эмиссионную активность и

однородность. На рисунке 15б приведены зависимости скорости восстановления эмиссии МНОК из фольги и проволоки во время воздействия СВЧ-мощности на входной резонатор ЦЗУ. Катоды 1 и 2 после воздействия СВЧ-мощности показали меньшее падение тока, чем катоды 3 и 4, что может свидетельствовать о меньшем отравлении эмиссионного слоя ионами остаточных газов. Дополнительным фактором, оказавшим влияние на увеличение скорости восстановления эмиссии, улучшение эмиссионных характеристик и меньшее отравление катода из фольги ВР-27ВП, являлась более высокая температура зерна. Пирометрирование катодов, установленных в стеклянных колбах при уровне вакуума 10^{-7} мм рт.ст., на инфракрасном пирометре ВИМП-015 показало, что зерно из фольги имело температуру на 25 – 30°C выше, чем из проволоки.

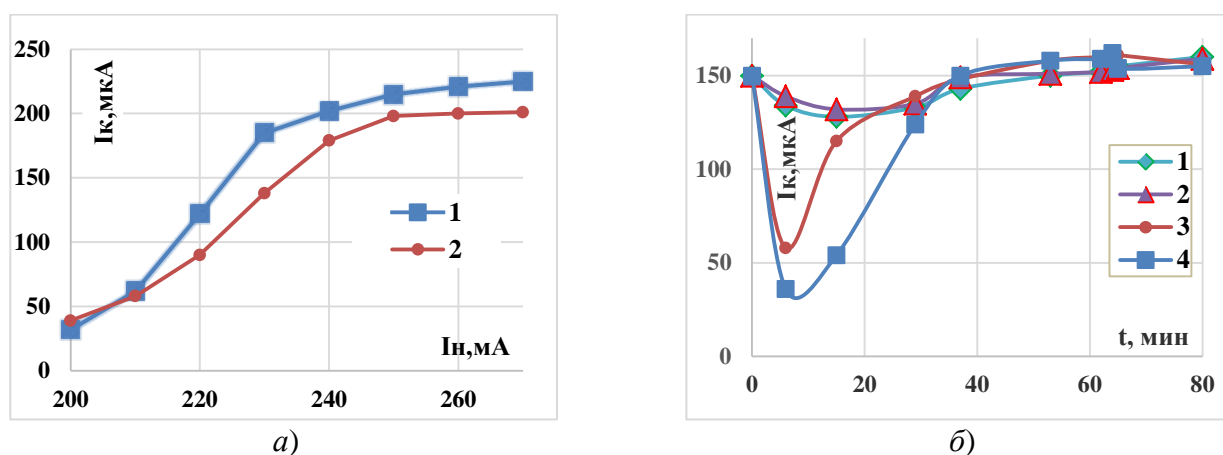


Рисунок 15. Неодкальные характеристики МНОК (а) и зависимость скорости восстановления эмиссии от времени (б): (а) – фольга (1), проволока (2); (б) – фольга (1,2); проволока (3,4)

Испытания катода, проведенные в режиме циклического включения накала (4 секунды включено, 4 секунды выключено) при рабочей температуре не более 650°C показали, что после 1,39 млн. циклов формоустойчивость МНОК из фольги не ухудшилась.

При исследовании катодов из проволоки и фольги, установленных в ЦЗУ, на устойчивость к паразитным компонентам акустических шумов выходного сигнала, использовался анализатор сигналов Keysight PXA Signal Analyzer N 9030A. В качестве генератора сигналов использовался Agilent Technologies E8257D 250kHz-20GHz PSG. Для проведения сравнительных исследований катодов была разработана следующая методика испытаний. Сигнал подавался с генератора на вход ЦЗУ, а выходной сигнал с ЦЗУ поступал в анализатор сигналов. При воздействии на ЦЗУ механических колебаний, выходные сигналы имели спектры с дополнительными компонентами, сдвинутыми на частоты механических резонансов (рисунок 16). Анализ спектров на рисунке 16 показал, что резонансные частоты катода из фольги равны 7,72 кГц и 14,52 кГц, а для катода с подогревателем из проволоки – 2,76 и 5,56 кГц. Таким образом, в разработанной конструкции катодов из фольги паразитные компоненты выходного спектра оказались на 25–30 dB ниже, а резонансные частоты в 2,8 раза выше, чем у катода из проволоки. Разработанная конструкция катода с

повышенной жесткостью и виброустойчивостью показала стабильную работу в непрерывном режиме с плотностью тока 2 – 3 А/см² и рабочей температурой до 650°С в течение 5000 часов.

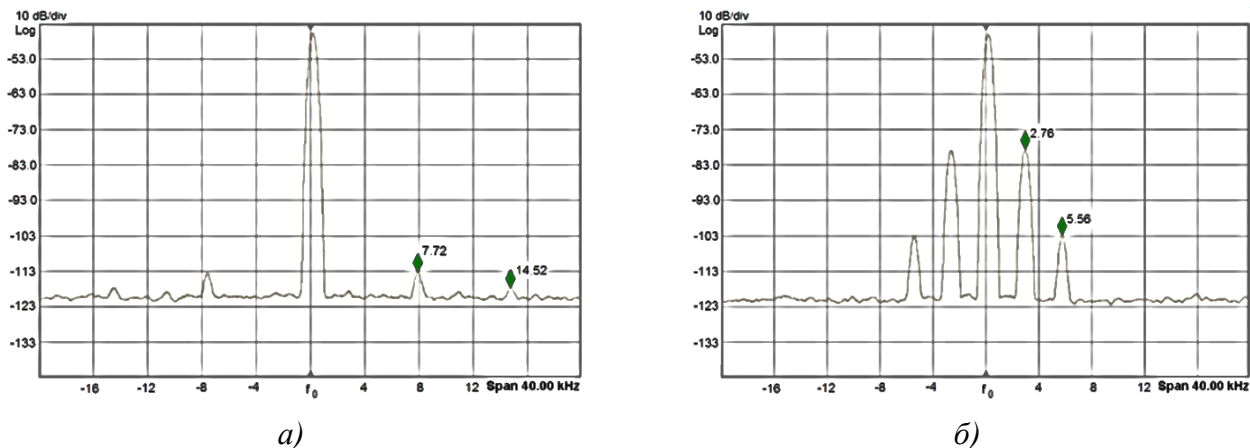


Рисунок 16. Спектры выходного сигнала ЦЗУ: катод из фольги ВР-27(*а*), катод из проволоки ВР-27, ВР-2 (*б*)

Для сравнения на рисунке 17 показаны изображения фрагментов катодов, изготовленных с применением ЛПМ и фемтосекундного волоконного лазера.

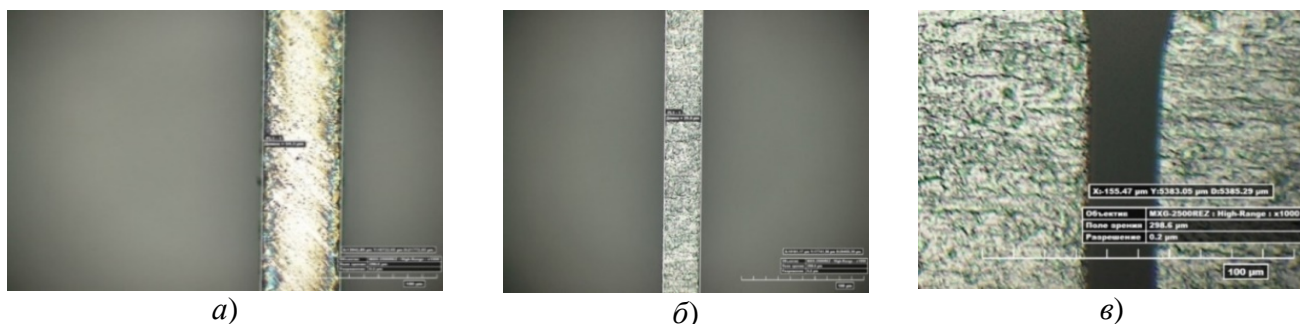


Рисунок 17. Изображения МНОК: катод изготовлен ЛПМ (*а*); подогреватель и катод изготовлены фемтосекундным лазером (*б, в*). Увеличение $\times 200 - 1500$

На рисунке 18 представлены эмиссионные характеристики в ЦЗУ МНОК изготовленных фемтосекундным лазером.

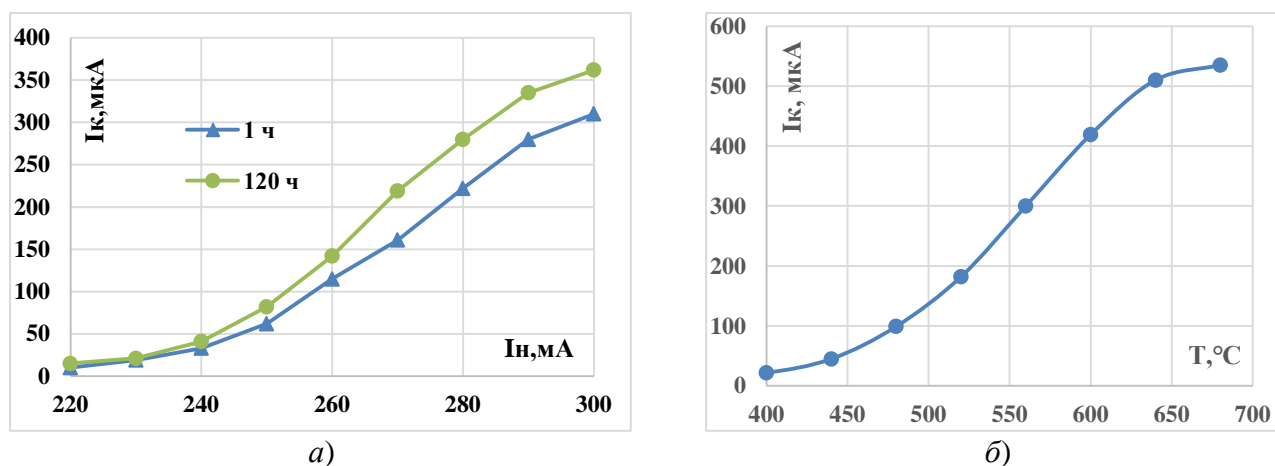


Рисунок 18. Эмиссионные характеристики МНОК, изготовленных фемтосекундным лазером: после 120 часов работы (*а*) и 270 часов работы (*б*)

Расстояние катод-анод – 120 мкм, напряжение на аноде 12 В (*а*) и 15 В (*б*). С увеличением длительности работы ток катода возрос. МНОК показал стабильную работу в макете ЦЗУ в непрерывном режиме с рабочей температурой 600 – 650°С при плотности тока 2 А/см² в течение 500 часов.

Применение лазерной технологии с фемтосекундными импульсами позволило отказаться от механической операции сплющивания керна и устранить термическое воздействие лазерного излучения на фольгу. Шероховатость поверхности лазерного реза составила менее 1 мкм, что свело к минимуму последующую химическую обработку кернов. Изготовление деталей в режиме массива позволило получить 50 катодов за 30 минут.

На рисунке 19 представлены эмиссионные характеристики МНОК в макетах ЦЗУ, изготовленных ЛПМ, после 500 часов работы: в виде цельной конструкции (*а*) и с приваренным к подогревателю керном (*б*). Напряжение на аноде составляло 10 В и 14 В, соответственно.

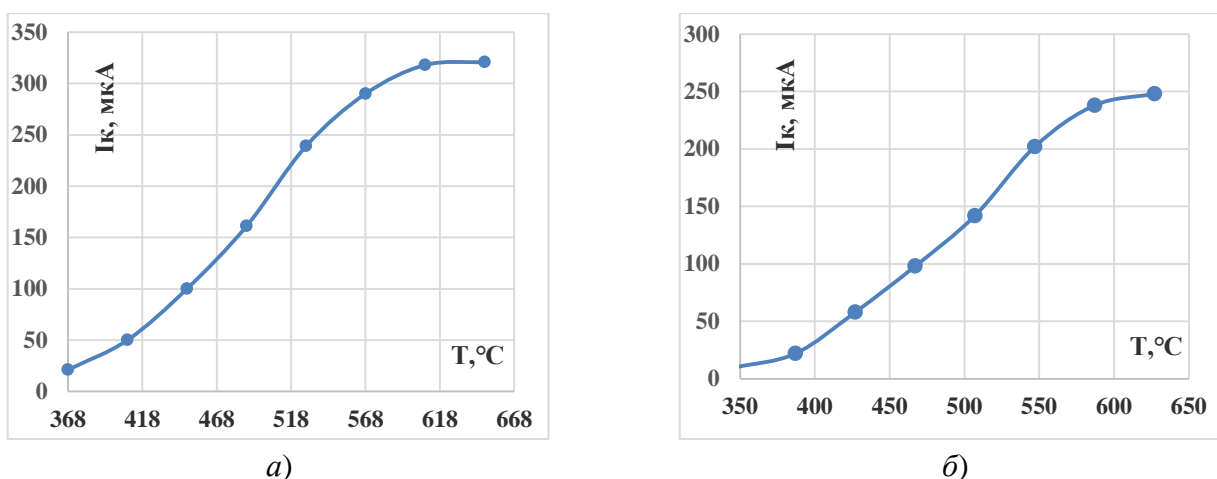


Рисунок 19. Недокальные характеристики МНОК, изготовленных ЛПМ: в виде цельной конструкции (*а*), с приваренным керном (*б*)

Керн из проволоки ВР-20 приваривался к подогревателю и подвергался плющению до толщины 20 мкм. Катоды данной конструкции испытаны на вибростенде на внешние воздействующие факторы с применением синусоидальных колебаний в диапазоне вибраций 10 – 2500 Гц и ускорением до 10g в течение 5 часов. После испытаний механическая прочность катодов не нарушилась, а эмиссионные свойства МНОК не ухудшились.

На рисунке. 20 показан график испытаний на долговечность МНОК, изготовленного ЛПМ из фольги в виде цельной конструкции.

При работе МНОК с плотностью тока 2,6 А/см² в макете ЦЗУ в течение 2000 часов наблюдалось незначительное (~10 мкА) ухудшение эмиссии. Анализ эмиссионных характеристик МНОК, изготовленных как из фольги с применением лазера, так и традиционным механическим способом, показал, что их эмиссионные свойства практически не отличаются, но механическая устойчивость катодов из фольги существенно выше.

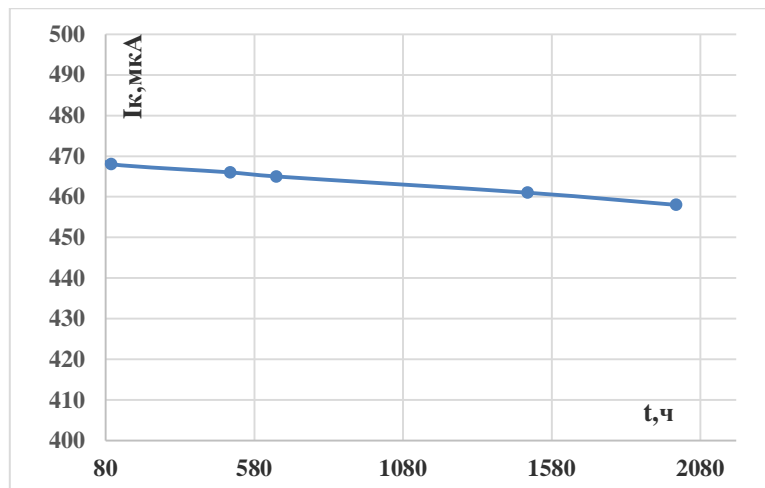


Рисунок 20. Испытания на долговечность МНОК, изготовленного ЛПМ из фольги

Результаты проведенных исследований эмиссионных свойств катодов, изготовленных с применением ЛПМ и фемтосекундного лазера, позволили выработать четвертое научное положение:

Применение лазерной прецизионной микрообработки при изготовлении подогревателя в форме меандра из фольги сплава ВР-27 ВП толщиной 50 мкм с уменьшенными размерами обеспечивает понижение уровня паразитных компонент выходного сигнала в ЦЗУ на 25–30 дБ, за счет улучшения механической устойчивости катода.

Основные результаты и выводы

На основе комплексных технологических и физико-химических методов исследований в диссертационной работе решена задача по улучшению эмиссионных и эксплуатационных свойств МНОК, разработана промышленная технология изготовления конструкций МНОК из 50 мкм вольфрамениевой фольги с применением ЛПМ и фемтосекундного лазера, позволившая получить следующие результаты:

1. Повторный отжиг в водороде в течение 30 минут при температуре 1050°C напыленной на kern катода пленки иридия изменил ее микроструктуру и химический состав поверхности, что способствовало ускоренному активированию и улучшению эмиссионных свойств МНОК.

2. Для получения МНОК с оптимальными эмиссионными и эксплуатационными характеристиками в ЦЗУ необходимо, чтобы: в процессе осаждения на kern М-покрытия толщиной 0,8 – 1 мкм в используемой установке напыления температура подложки с катодами не превышала 260°C; температура распыляемой мишени (Ba,Sr,Ca)CO₃ при осаждении в смеси газов Ar/CO₂ (Xe/CO₂) и давлении 0,075 – 0,13 Па находилась в диапазоне 750 – 780°C; радиальное расстояние от катодов до центра подложки составляло 33 – 36 мм, а расстояние до мишени – не менее 21 – 24 мм.

3. Найден оптимальный уровень СВЧ-мощности (4 – 10 Вт), необходимый на входном резонаторе для очистки внутренней поверхности ЦЗУ и последующей стабилизации тока МНОК.

4. Оптимизация параметров ионно-плазменного напыления, включающих в себя: разложение карбонатов мишени в течение 60 – 90 минут со скоростью эвакуации газов 300 – 500 л/сек; поддержание температуры подложки с катодами в диапазоне 220 – 260°C; проведение процесса напыления в едином вакуумном цикле; поддержание тока разряда 200 мА, а напряжения на мишени 800 В, позволила создать МНОК с улучшенными эмиссионными свойствами и плотностью тока более 10 А/см² в непрерывном режиме при долговечности более 1400 часов. При плотности тока 1,5 – 2 А/см², толщине эмиссионного покрытия 0,8 – 1 мкм и рабочей температуре до 650°C достигнута долговечность МНОК в ЦЗУ до 16 тыс. часов.

5. Прецизионная микрообработка вольфрамрениевой фольги с применением наносекундного ЛПМ позволила изготавливать МНОК с повышенной жесткостью и виброустойчивостью, что обеспечило понижение уровня паразитных компонент выходного сигнала в ЦЗУ на 25–30 дБ.

6. Экспериментальные исследования МНОК показали, что способ прецизионной микрообработки лазерным излучением с фемтосекундной длительностью импульсов по сравнению с другими способами изготовления катодов имеет ряд преимуществ, к которым относятся: высокая производительность; субмикронная шероховатость поверхности реза; отсутствие зоны термического влияния и грата; исключение операции химической очистки катодов от шлака.

Разработанные на основе созданной промышленной технологии образцы МНОК испытаны в составе ЦЗУ. Полученные в ходе диссертационной работы результаты внедрены в производство и использованы при разработках ЦЗУ, работающих на частотах до 40 ГГц.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК РФ или индексируемые в международных базах Scopus, Web of Science:

1. Жабин, Г. А. Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 49 – 53.

2. Жабин, Г. А. Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2017. – Вып. 4 (538). – С. 15 – 21.

3. Жабин, Г. А. Молекулярно-напыленный оксидный катод с повышенной до 10 А/см² плотностью тока / Г. А. Жабин, З. М. Магамеднебиев, А. Н. Пашков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2018. – Вып. 3 (538). – С. 50 – 58.

4. Жабин, Г. А. Морфология поверхности, фазовый и элементный состав молекулярно-напыленных оксидных покрытий / Г. А. Жабин, М. В. Злыгостов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 44 – 50.

5.Жабин, Г. А. Влияние режимов ионно-плазменного напыления на микроструктуру и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, М. П. Темиряева // Прикладная физика. – 2019. – № 5. – С. 54 – 59.

6.Жабин, Г. А. Влияние повышенного отбора тока на состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2019. – Вып. 4 (543). – С. 45 – 49.

7.Жабин, Г. А. Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Д. М. Седловец, М. П. Темиряева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 34 – 45.

8.Жабин, Г. А. Применение лазера на парах меди в изготовлении молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, Н. А. Лябин, Д. Ю. Архипов, В. С. Парамонов, В. В. Федотов, К. О. Долгих // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 4 (547). – С. 90 – 97.

9.Жабин, Г. А. Долговечность молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин, И. П. Иваненко // Прикладная физика. – 2020. – № 6. – С. 73 – 79.

10.Жабин, Г. А. Возможности применения фемтосекундного волоконного лазера в изготовлении термоэмиссионных катодов / Г. А. Жабин, Н. А. Лябин, Е. В. Скупневский, Д. Ю. Архипов, К. О. Долгих // Прикладная физика. – 2021. – № 2. – С. 67 – 73.

11.Жабин, Г. А. Сравнительные характеристики термоэмиссионных катодов, изготовленных с применением наносекундного лазера на парах меди и фемтосекундного волоконного лазера / Г. А. Жабин, Ю. А. Будзинский, Н. А. Лябин, Е. В. Скупневский, Д. Ю. Архипов, К. О. Долгих, В. В. Федотов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 2 (549). – С. 61 – 66.

Патентные документы

1.Молекулярно-напыленный оксидный катод. Патент № 2747505. Жабин Г. А., Будзинский Ю. А., Лябин Н. А., Архипов Д. Ю., Шерстяных Р. И., Федотов В. В. Заявка № 2020131146 от 21.09.2020 г. Оpubл. 06.05.2021.

Другие публикации по теме диссертации:

1.Жабин, Г. А. Особенности работы молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» – Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. – 2017. – С. 100 – 103.

2.Жабин, Г. А. / Молекулярно-напыленные оксидные катоды в СВЧ-приборах на циклотронном резонансе // Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец / Труды 27-й Международной Крымской конференции. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо 2017. – Севастополь. – 2017. – С. 192 – 198.

3.Жабин, Г. А. Особенности влияния отжига зерна на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «Intermatic-2017». М.: РГТУ МИРЭА. – 2017. – Т. 3. – С. 622 – 625.

4.Жабин, Г. А. О технологии изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов с повышенной плотностью тока / Г.А. Жабин // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» – Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2018. – С. 182 – 186.

5.Жабин, Г. А. / Совершенствование технологии изготовления молекулярно-напыленного оксидного катода // Г.А. Жабин / Труды 28-й Международной Крымской конференции. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо 2018. – Севастополь. – 2018. – С. 253 – 257.

6.Жабин, Г. А. Фазовый и элементный состав молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, М. В. Злыгостов // Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. – 2019. – С. 112 – 116.

7.Жабин, Г. А. Влияние токоотбора на элементный состав поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г. А. Жабин, Д.Ю. Архипов, О.В. Пелипец // Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» – Санкт-Петербург. СПбГЭТУ, 2019. – С. 79 – 83.

8.Жабин, Г. А. Влияние температуры мишени при ионно-плазменном напылении на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, О.В Пелипец // Тезисы докладов 29-й Международной Крымской конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2019. – С. 35 – 36.

9.Zhabin, G.A. The effect of gas pressure during ion-plasma deposition on the micro-structure of M-coatings and the emission properties of molecular sputter-deposited oxide cathodes [Электронный ресурс] / G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov // ITM Web of Conferences. –2019. –V. 30. P. 02006. https://www.itmconferences.org/article/itmconf/pdf/2019/07/itm.conf_crimico2019_02006.pdf (дата обращения: 03.04.2021).