

На правах рукописи



Поливникова Ольга Валентиновна

УДК.621.385.7

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ
МАГНЕТРОННЫХ КАТОДОВ НА ПРИНЦИПЕ ПЕРЕНОСА
АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ НЕЗАВИСИМОГО ИСТОЧНИКА НА
ЭМИТИРУЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЧЕРЕЗ ВАКУУМ

Специальность

05.27.02

«Вакуумная и плазменная электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Фрязино, 2006 г.

Работа выполнена на Федеральном Государственном Унитарном Предприятии
«Научно-производственное предприятие «Исток»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Дюбуа Борис Чеславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор Масленников Олег Юрьевич

кандидат технических наук
Каргин Александр Николаевич

Ведущая организация: ОАО «Плутон», г. Москва.

Защита состоится « 19 » декабря 2006 г. в 11 часов
на заседании диссертационного совета Д 409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток»
по адресу: 141120, г. Фрязино, Московской обл, ул. Вокзальная, 2а, ФГУП
«НПП «Исток», Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток».

Автореферат разослан « 15 » ноября 2006 г.

Ученый секретарь



Э.В. Погорелова

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Удачное сочетание электроники с колебательной системой позволило магнетрону стать одним из наиболее эффективных генераторов для применения в диапазоне сантиметровых волн, как в радиолокационных системах, так и в качестве источника СВЧ-энергии в промышленных, медицинских и бытовых устройствах [1-3].

Область применения магнетронов непрерывного генерирования постоянно расширяется, что обусловлено рядом их достоинств: высоким к.п.д., низким анодным напряжением, стабильностью работы в условиях рассогласованной нагрузки, компактностью, простотой изготовления и сравнительно низкой стоимостью.

Однако все эти достоинства магнетрона могут быть реализованы только при решении целого комплекса катодных проблем. Особенностью работы катода в магнетроне является то, что катод находится непосредственно в области взаимодействия электронных потоков и высокочастотных полей. Катод подвергается воздействию электронной бомбардировки, что приводит к изменению его эмиссионных свойств и к дополнительному разогреву. Изменения же эмиссионных характеристик катода влияют на стабильность работы магнетрона и могут привести к изменению ряда его параметров: частоты генерируемых колебаний, электронного к.п.д. и пр., не говоря уже о том, что перегрев катода может привести к существенному уменьшению его долговечности [4].

В настоящее время источником электронов в магнетроне непрерывного генерирования традиционно остается прямонакальный спиральный катод из торированного вольфрама (Рис.1 а). Хотя этот катод и обеспечивает основные параметры магнетрона, но при этом обладает и рядом серьезных недостатков.

Катод из торированного вольфрама малоэффективен: для обеспечения выходной мощности магнетрона 500-900 Вт требуется мощность накала 40-50 Вт, что снижает полный к.п.д. установки. Катод может обеспечить долговечность магнетрона не более 2000 часов – для промышленной и бытовой аппаратуры этого недостаточно. Торированный вольфрам после проведения процесса его

карбидирования становится очень хрупким, что существенно снижает выход годных магнетронов, а также ограничивает использование ВЧ-печей в транспортных средствах.

Торированный вольфрам токсичен, что усложняет работу с ним, поскольку требует выполнения специальных санитарно-гигиенических мер при производстве катодов и магнетронов.

Однако среди известных конструкций катодных узлов в магнетронах непрерывного генерирования только спиральный прямонакальный катод из торированного вольфрама обеспечивает быстрое (2-3 сек) включение магнетрона без каких-либо дополнительных форсажных устройств.

Многочисленные попытки разработать проволоку по эмиссионным и механическим параметрам лучшего качества, чем торированный вольфрам, оказались безуспешными – слишком сложная физико-химическая и металлургическая проблема.

Поэтому поиск альтернативных конструкторско-технологических решений является актуальным. К их числу следует отнести использование автоэлектронной эмиссии для быстрого включения магнетрона [5], пленочной технологии: нанесение эмиссионно-активных слоев посредством плакирования, намазки, насева, вакуумного и плазменного напыления [6-10], изготовление спирали из цельного штабика, пропитанного активным веществом, путем его механической обработки [11].

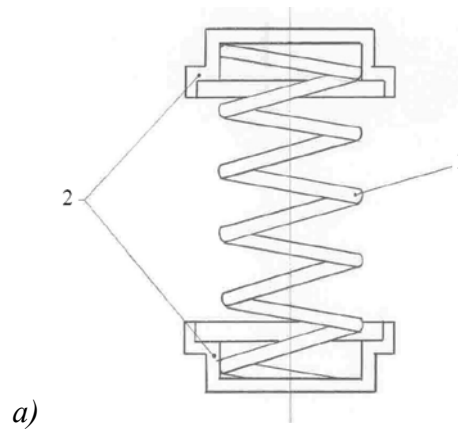
Однако необходимо учитывать, что пленочные методы имеют существенное ограничение: для увеличения долговечности катодов нужно увеличить запас активного вещества (толщину слоя), иными словами, общую массу катода, а, следовательно, ухудшить другой его параметр – время готовности.

Для разрешения этого противоречия в диссертации используется принципиально новый подход к конструированию катодного узла, заключающийся в том, что активное вещество поступает на эмиссионную поверхность из источника, отделенного от этой поверхности вакуумным промежутком. Устройство подобного рода получило название катода с вакуумным промежутком (КВП) (Рис1. б).

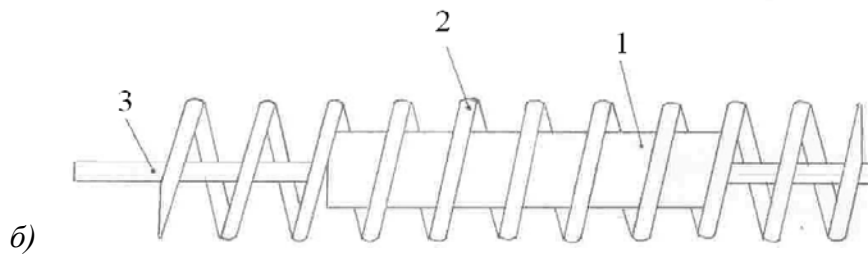
Другая возможность использовать идею переноса активного вещества через вакуум была реализована в конструкции квазипрямонакального катода (КПК). В этом случае эмиссионно-активная втулка размещается на центральной части

спирали, а эмиссия с боковых ветвей спирали, которые активируются испарением активного вещества из втулки, обеспечивает быстрое включение магнетрона (в).

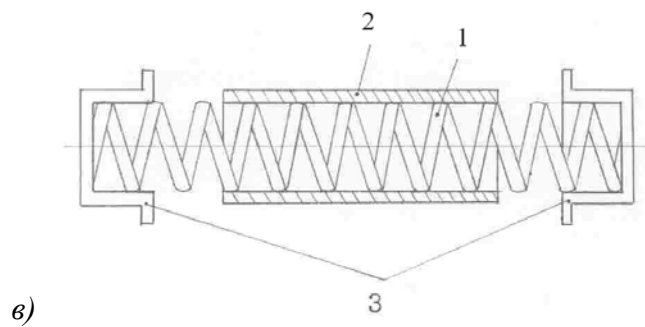
Основные варианты конструкций катодов представлены на Рис.1.



1-спираль из торированного вольфрама, 2-экраны из молибдена.



1-эмиссионная втулка, 2-спираль из вольфрама, 3-кэрн.



1-спираль, 2-эмиссионная втулка, 3-экраны.

Рис.1.Схематическое изображение прямонакального катода-ПК (а), катода с вакуумным промежутком -КВП (б), квазипрямонакального катода -КПК (в).

При выборе эмиссионных материалов предпочтение было отдано материалам металлического типа, которые используются для формирования эмиссионного тела металлопористых и металлосплавных катодов, т.е. материалам, наиболее полно удовлетворяющим требованиям, предъявляемым к магнетронным катодам.

Разработка прямонакальных катодов (ПК) в настоящей работе выполнена с использованием технологии нанесения пленки сплава иридия с лантаном на тугоплавкую подложку. Разработка КВП и КПК выполнена с использованием эмиссионных материалов, содержащих в качестве активных металлов барий, лантан или торий, т.е. материалов с сильно отличающимися эмиссионными характеристиками, что позволило получить важные данные для решения актуальной до настоящего времени проблеме - взаимосвязи эмиссионных характеристик катода и параметров магнетрона.

Цель работы заключается в создании надежных, недорогих, технологически доступных в массовом производстве катодов для магнетронов непрерывного генерирования и удовлетворяющих основным техническим требованиям: плотность отбираемого тока, время готовности, долговечность, устойчивость к механическим и циклическим тепловым нагрузкам.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать процесс диффузионного насыщения компактного и губчатого иридия лантаном из его жидкой и газовой фаз; изучить температурно-временные режимы, определяющие максимальную глубину проникновения лантана в иридий, и определить фазовый состав образующегося сплава; на основе этих исследований разработать технологию спирального катода с эмиссионным покрытием Ir-La; изучить эмиссионные характеристики и долговечность этих катодов;
- разработать основные приемы конструирования, выбора материалов и технологий изготовления катодов, принцип действия которых основан на процессе переноса активных веществ на эмиссионную поверхность из источника, отделенного от этой поверхности вакуумным промежутком (КВП, КПК);
- исследовать эмиссионно-адсорбционные и тепловые характеристики КВП и КПК, в которых в качестве активных материалов содержится алюминат бария-кальция, металлический лантан или торий; исследовать стабильность этих

характеристик во времени при различных температурных режимах работы катодов;

- разработать технологию пайки материалов, входящих в конструкцию КВП и КПК, исследовать глубину и динамику взаимодействия припоя с этими материалами, и влияние материала припоя на эмиссионные характеристики, устойчивость конструкции к циклическим включениям и долговечность катодов;
- исследовать эмиссионные и тепловые характеристики катодов в магнетронах и связь этих характеристик с параметрами магнетрона (мощность, время готовности, к.п.д., долговечность).

Научная новизна.

1. Впервые исследовано взаимодействие расплавленного лантана с иридиевой губкой в диапазоне температур 1700-1800°C; показано, что при этих температурах глубина взаимодействия составляет 30-50 мкм и основным ограничивающим фактором более глубокого проникновения лантана в глубь иридиевой губки является образование интерметаллического соединения Ir_2La , которое препятствует взаимной диффузии иридия и лантана.
2. На основе разработанного процесса легирования торца иридиевой проволоки лантаном из его газовой фазы впервые создана структура эмиссионной поверхности металлосплавного микрокатада (в частности, автокатада), состоящая из двух фаз: центральная часть катода – фаза Ir, периферия – фаза Ir_2La (толщина 5-6 мкм), при этом показано, что для эффективной работы катода при температуре 1500-1700К размер фазы Ir не должен быть более 100 мкм.
3. Предложен новый принцип работы распределительного катода, в котором эмиссионная поверхность отделена от источника активного металла вакуумным промежутком, что обеспечивает возможность независимо изменять температуру эмиссионной поверхности и источника, оптимизируя работу катодного узла.
4. Показано, что увеличение температуры распайки припоев Ru-B, Rh-B, Ir-B, Pt-B, Ni-B при пайке деталей из вольфрама и молибдена происходит вследствие изменения состава припоя: бор взаимодействует с вольфрамом и молибденом, образуя бориды этих металлов, а вольфрам и молибден, в свою очередь, растворяется в рутении, родии, иридии, платине или никеле.
5. Изучен механизм запуска и работы магнетрона с квазипрямокальным катодом, в котором эмиссионно-активное вещество содержит барий, лантан или

торий. Найдена количественная связь между термо- и вторично-эмиссионными характеристиками катода и его рабочей температурой в приборе.

Практическая значимость.

1. Разработана технология многослойного слоисто-структурированного Ir-La катода, позволившая увеличить долговечность катода в магнетроне в 2-3 раза.
2. Разработана технология острейного автотермоэлектронного Ir-La катода, который обеспечивает отбор тока 20-30 мА в постоянном и 300-400 мА в импульсном режиме. Использование этого катода совместно с основным спиральным катодом из торированного вольфрама позволило уменьшить мощность накала катода в магнетроне в 2-2,5 раза.
3. Разработаны конструкции и технологии изготовления катода с вакуумным промежутком и квазипрямокального катода, эмиссионное тело которых представляет собой вольфрамовую губку, пропитанную алюминатом бария-кальция, лантаном или торием. Испытания разработанных катодов в промышленных магнетронах (мощность 800 Вт, частота 2460 МГц) показали, что они обеспечивают требуемые электрические параметры и механическую прочность в течение не менее 6000 часов.
4. Разработана технология пропитанных ториевых катодов, которая обеспечивает их пониженную радиоактивность после финишной операции пропитки в течение не менее одного месяца, что позволяет откорректировать санитарно-гигиенические меры безопасной работы с этими катодами.
5. Разработаны составы припоев и технология низкотемпературной пайки в вакууме и в водороде ($t_{\text{пайки}}=1250-1300^{\circ}\text{C}$) элементов катодного узла, обеспечивающая прочность узла и стабильность структуры, эмиссионных и других физико-химических свойств паяных элементов при постоянном и циклическом нагреве.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Увеличение запаса активного вещества в слоистых металлосплавных Ir-La катодах достигается путем последовательного увеличения количества слоев губки иридия, пропитываемой лантаном; при этом для полного взаимодействия

иридия с лантаном с образованием соединения Ir_2La толщина каждого слоя иридия должна быть в пределах 30-50 мкм.

2. Для создания полевых острийных катодов из двухфазных сплавов, например, иридия с лантаном, необходимо фазы этого сплава расположить компактно так, чтобы фаза, представляющая собой чистый металл (иридий) являлась керном острия, а фаза, содержащая активный металл (Ir_2La), располагалась по периферии этого керна и являлась источником лантана, активирующего острие. Такая структура острия создается путем выдержки иридиевой проволоки в парах лантана с последующим ее электрохимическим травлением, обеспечивающим создание острия с малым радиусом кривизны (0,3-0,4 мкм).

3. Создание катодов с вакуумным промежутком основывается на пространственном разделении источника эмиссионно-активного вещества и эмиттера, что в магнетронных катодах реализуется путем размещения втулки с активным веществом внутри спирального эмиттера; при этом рабочие температуры источника и спирали выбираются так, чтобы поток активного вещества обеспечил требуемую величину тока эмиссии спирали.

4. Применение сплавов никеля и платиновых металлов с бором для пайки элементов катодного узла при температуре, меньшей, чем максимальная рабочая температура катода в приборе, обеспечивается:

- выбором режима пайки, в процессе которой в основе припоя растворяется тугоплавкий паяемый материал, например, W, Mo, а бор уходит из припоя, образуя бориды тугоплавких металлов;
- выбором оптимальной ширины паяемого зазора, обеспечивающей при пайке полное насыщение тугоплавким материалом объема припоя и необходимое согласование коэффициентов теплового расширения паяемых материалов.

5. Эффективная работа квазипрямокального магнетронного катода основывается на том, что спираль, на которой крепится эмиссионная втулка, выполняет функцию нагревателя, а также, находясь в потоке активного вещества, испаряющегося из эмиссионной втулки, является источником стартовой термоэлектронной эмиссии, обеспечивающей быстрый запуск магнетрона в работу.

Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений подтверждается достаточно хорошим совпадением данных, полученных на основе экспериментальных исследований и путем численных расчетов, получением воспроизводимых результатов при использовании различной аппаратуры и методов исследования, опытом разработки и применения созданных катодов в приборах

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXII Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике (Москва, 1994 г.); на International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC'96, Eindhoven the Netherlands); на Всероссийском симпозиуме по эмиссионной электронике (Рязань, 1996 г.); IVESC'98 (Tsukuba, Japan, 1998); II International Conference on Microwave and Millimeter wave Technology, Beijing, China, 2000; IVESC'00 (Orlando, Florida, 2000); IVESC'02 (Саратов, 2002 г.), IVESC 2004 (Beijing, China).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в отечественные разработки катодных узлов для магнетронов, используемых в бытовых, промышленных и медицинских установках и катодных узлов для мощных усилительных клистронов (9 наименований приборов), а также при выполнении зарубежных контрактов с США, КНР, Кореей, Индией (16 контрактов на общую сумму около 300 тыс.\$).

Публикации. Основные материалы диссертационной работы отражены в 10 печатных работах, результаты защищены 2 авторскими свидетельствами и 2 Патентами РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из шести разделов и списка литературы, изложенных на 138 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 56 рисунков и приложение на 5 страницах.

Содержание работы

Первый раздел является введением, в котором обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель и определено общее направление исследований.

Второй раздел посвящен анализу литературных и патентных источников информации о развитии и решении комплекса проблем, связанных с катодом для

магнетронов. Приведены основные характеристики и принципы конструирования зарубежных и отечественных катодов для магнетронных приборов, отмечены их недостатки. Показано, что перспективным направлением является дальнейшее совершенствование существующих катодов с целью повышения их эффективности, расширения области применения путем исследования и разработки новых эмиссионных материалов, конструкций катодных узлов и технологии их производства. Дано краткое содержание работы и сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения основной цели диссертации.

Третий раздел посвящен прямонакальным катодам (ПК). В этом разделе описана и известная конструкция спирального прямонакального катода из торированного вольфрама и, как альтернатива ему, предложен спиральный катод с покрытием из эмиссионно-активного материала Ir-La, которое представляет собой иридиевую губку, пропитанную лантаном. Показано, что с увеличением толщины губки максимальное относительное количество лантана, которое удастся ввести в губку, уменьшается; а наибольшее количество лантана можно внести при толщинах губки меньше 30мкм (Рис.2).

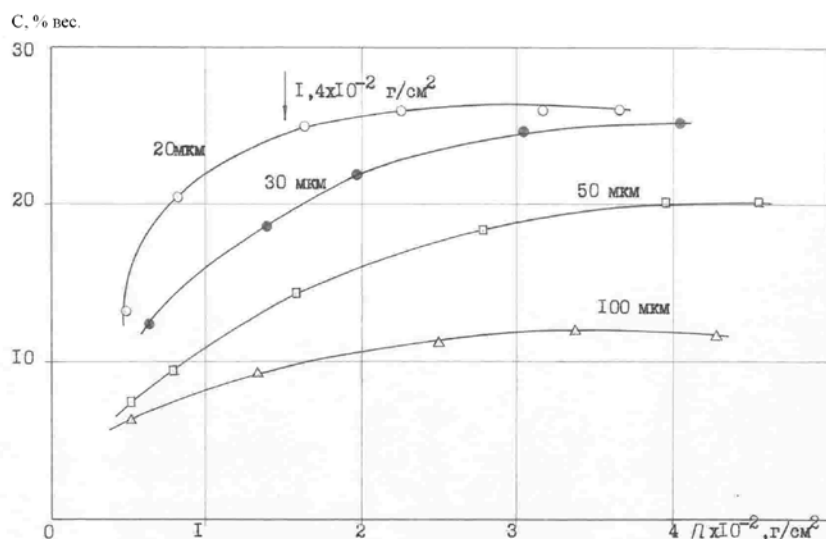


Рис.2. Зависимость привеса образцов катодов от количества наносимого лантана на губку иридия различной толщины после их отжига в вакууме при температуре 1700°C_{ярк.}

Это объясняется тем, что расплавленный лантан проникает в губку не более чем на 30мкм, а образуемое при этом интерметаллическое соединение Ir₂La ,

блокирует диффузию лантана и иридия сквозь это соединение, а также закрывает поры в губке и тем самым предотвращает дальнейшее проникновение лантана в глубь губки.

С учетом полученных результатов исследований для увеличения запаса активного материала в катоде предложен технологический процесс, в котором слои иридия и лантана наносились последовательно несколько раз с промежуточными отжигами. Таким катодам было дано название слоисто-структурированных (ССК). Эмиссионное покрытие этих катодов общей толщиной 150-200мкм может содержать максимально возможное количество лантана (до 27%) (Рис.3), а долговечность таких катодов в 2-3 раза превышает долговечность однослойных.

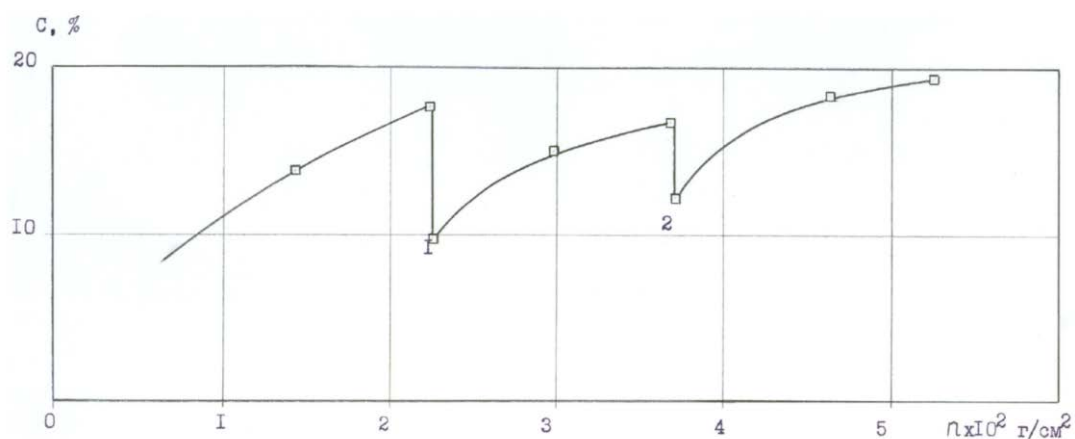


Рис.3. Зависимость привеса образцов катодов от количества наносимого лантана на губку иридия. В точках 1 и 2 повторена операция нанесения иридия.

В этом же разделе описан, предложенный автором, новый способ создания слоев сплава Ir-La, основанный на насыщении поверхности иридия лантаном из его газовой фазы, который позволил свести к минимуму окисление активной компоненты сплава – лантана во время его нанесения и добиться более равномерной толщины слоя.

Разработанный способ позволил также по-новому подойти к решению проблемы создания автотермоэлектронного катода (АТЭК) в виде очень тонкой фольги или острия и использовании его для уменьшения времени запуска магнетронов.

Поскольку применение эмиссионно-активных двухфазных сплавов для изготовления АТЭК традиционными методами невозможно, предложен иной подход, основанный на использовании явления активирования острия за счет миграции активного металла с прилегающих к острию областей. Применение в этом случае технологии выдержки иридиевой проволоки в парах лантана с последующим электрохимическим травлением ее конца обеспечивает такое расположение фаз сплава, которое дает возможность создания острия с малым радиусом кривизны (0,3-0,4мкм) и реализацию распределительного принципа работы металлосплавного катода. Внешне катод напоминает карандаш (Рис.4), в котором роль грифеля выполняет иридий, а наружной оболочки – интерметаллид Ir_2La . В этом случае моноатомная пленка лантана на поверхности иридиевого острия создается путем миграции лантана, источником которого является интерметаллическое соединение Ir_2La , расположенное, как «воротник» вокруг острия.

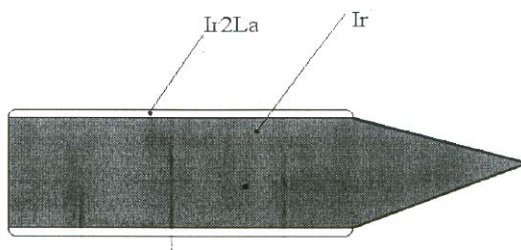


Рис.4. Принципиальная схема острейного автотермоэлектронного катода, полученного путем насыщения поверхности иридиевой проволоки лантаном из его газовой фазы.

Зависимость автоэлектронной эмиссии от температуры представлена на Рис.5. Исследования проводились в вакууме 10^{-5} Па, поэтому имело место несовпадение токов автоэлектронной эмиссии, измеренных при повышении и снижении температуры острия, что, скорее всего, связано с изменением количества адсорбированных остаточных газов на поверхности острия при изменении его температуры. Тем не менее, характер и величина изменений автоэлектронной эмиссии в изученной области температур следует теоретическим предсказаниям: на Рис.5 сплошная кривая – результаты расчетов температурной зависимости

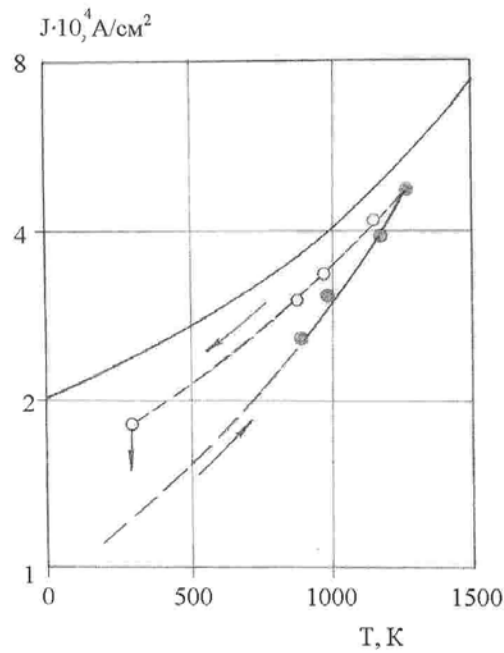


Рис.5. Зависимость плотности тока автотермоэлектронной эмиссии Ir-La острия от температуры: ●- при повышении температуры, ○- при ее снижении.

Радиус кривизны острия-0,3 мкм, поле- 2×10^7 В/см. Сплошная кривая-результат теоретического расчета по формуле (1) при $\phi=2,7$ эВ.

автоэлектронной (а в данном случае следует говорить об автотермоэлектронной) эмиссии по формуле [12,13]:

$$\frac{I(T)}{I(0)} = 1 + \frac{1,4 \times 10^8 \phi T^2}{E^2} \quad (1)$$

Данные по эмиссионным параметрам и долговечности для прямонакальных катодов с Ir-La покрытием приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Эмиссионные характеристики и долговечность Ir-La катодов.

№	Тип Ir-La покрытия	$\phi_{1500\text{K}}$ эВ	$\frac{\partial \phi}{\partial T}$, эВ/град	Долговечность при $T=1250^\circ \text{ }_{\text{пр}}\text{C}$, час .
1	1слойный, намазка	$2,60 \pm 0,05$	$\sim 5 \times 10^{-5}$	1700 ± 100
2	3слойный, намазка	$2,55 \pm 0,05$	$\sim 7 \times 10^{-5}$	3500 ± 120
3	Ir-губка насыщ.из газовой фазы	$2,65 \pm 0,05$	$\sim 4 \times 10^{-5}$	1500 ± 100
4	Ir-проволока, насыщ из газовой фазы	$2,68 \pm 0,05$	$\sim 3 \times 10^{-5}$	800 ± 50

Испытания автотермоэлектронных катодов на долговечность проводились в экспериментальных диодах при температуре 1000К в постоянном режиме с отбором тока 20-30мА. В таком режиме катоды работали стабильно в течение 800-1000 часов; через каждые 100 часов срока службы проводилась проверка эмиссии в импульсном режиме, которая фиксировала стабильный ток 300-400мА при поле $2-3 \cdot 10^7$ В/см в течение указанного времени испытаний.

Четвертый раздел посвящен предложенным и разработанным автором прямонакальным и квазипрямонакальным катодам с вакуумным промежутком (КВП, КПК). Описаны конструкции, предложена модель механизма работы таких катодов и технология их изготовления.

Для прямонакальных спиральных катодов предложенная идея пространственного разделения источника активного вещества и эмиссионной поверхности катода вакуумным промежутком реализуется путем размещения втулки с эмиссионно-активным веществом внутри спирали (Рис.1б).

Из втулки, нагретой за счет излучения спирали, испаряется активный металл и осаждается на внутренней поверхности спирали, а затем за счет миграции покрывает всю ее поверхность. Оптимизация работы такого катодного узла достигается путем соответствующего выбора тепловых режимов работы всех его элементов и, исходя из этих режимов и требований обеспечения нужного катодного тока, выбором активного металла. Поддержание необходимого потока активного металла в течение всего срока службы является важным фактором в обеспечении работоспособности КВП.

Менее жесткие требования к стабильности потока активного металла необходимо выполнять для обеспечения работоспособности КПК (Рис.1в), т.к. в этом случае электронная эмиссия спирали должна быть достаточной только для запуска магнетрона.

В рассматриваемом разделе представлены исследования и результаты разработки технологий изготовления этих катодов. Технология изготовления эмиссионного тела разбивается на три процесса: изготовление металлической губки; изготовление активного вещества и пропитка металлической губки активным веществом.

Металлическая губка должна удовлетворять следующим требованиям:

- пленка атомов активного металла, адсорбированного на поверхности губки, должна обладать высокими эмиссионными и адсорбционными свойствами;
- поры в губке должны быть равномерно распределены по ее объему;
- стабильность формы губки должна сохраняться в процессе ее пропитки активным веществом.

Последнее требование особенно важно в условиях массового производства катодов или при использовании активных веществ, содержащих радиоактивные элементы, когда необходимо снижать количество технологических обработок губки после ее пропитки активным веществом.

Необходимая стабильность технологического процесса изготовления пористых вольфрамовых губок была получена при использовании технологии меднения пресованных вольфрамовых заготовок. Изготовление вольфрамовой губки, основанное на этой технологии, широко используется при изготовлении бариевых металлопористых катодов (W-Ba). Ее применение для более высокотемпературных (W-La, W-Th) катодов стало возможным после проведения корректировки отдельных этапов технологического процесса.

Цель корректировки в том, чтобы на конечной стадии технологического процесса – пропитки активным веществом вольфрамовой пористой губки происходили бы незначительные или хотя бы прогнозируемые изменения ее размеров, а количество впитавшегося эмиссионно-активного вещества составляло бы 6-8%. Экспериментально было установлено – такое количество активного вещества впитывает в себя губка, пористость которой перед пропиткой составляет 23-26%, при этом сохраняется и стабильность ее формы.

Описана последовательность и даны температурные режимы пропитки вольфрамовой губки активными веществами: алюминатом Ba-Sa в водороде и La и Th в вакууме.

Для контроля стабильности технологического процесса изготовления торийсодержащих катодов используется естественная радиоактивность тория.

Для этого исследовалась зависимость интенсивности радиоактивного излучения тория от температуры его обработки в вакууме и времени его хранения. Показано, что в результате температурной обработки катодов, содержащих торий, существенно уменьшается их радиоактивность, что связано с изменением изотопного состава тория, поскольку практически все члены радиоактивного ряда тория обладают более высоким давлением пара,

чем исходный элемент Th^{232} . Поэтому при пропитке катодов торием в вакууме при температуре 2000°C , такие элементы как Ac^{228} , Ra^{222} , Po^{212} , Bi^{212} , Tl^{208} , Pb^{208} оседают на холодных стенках камеры печи, кроме Th^{232} , который и проникает в поры губки. Начальная радиоактивность вольфрамовой губки, сразу после пропитки торием, близка к фоновой, а с течением времени она возрастает. Наибольшая скорость роста наблюдается в первые 30 дней. Экранирующее действие вольфрама наиболее эффективно также в первые 20-30 дней. Таким образом, по интенсивности наиболее проникающего γ -излучения можно судить об объемном распределении тория в губке, учитывая при этом поглощающую способность вольфрама.

В этом разделе рассмотрена также проблема крепления эмиссионного тела к керну (держателю). Наиболее рациональным и надежным способом крепления является пайка. Технология пайки деталей, содержащих эмиссионно-активные вещества, как и сам материал припоя, должны удовлетворять специальным требованиям: температура пайки должна быть как можно ниже, чтобы исключить выплавы активного вещества из губки и напыление посторонних веществ на эмиссионное тело, уменьшить рекристаллизацию керна и пр.; - материал припоя не должен отравлять эмиссию катода.

Исходя из этих требований, выбраны составы припоев, которые исследовались и применялись в настоящей работе для пайки эмиссионного тела к держателю и которые представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Состав припоев и температура их пайки в среде водорода и в вакууме.

Состав припоя, % вес.	T пайки $^\circ\text{C}$ в водороде	T пайки $^\circ\text{C}$ в вакууме 10^{-5}Па
Ru-B (9-10%)	1450	—
Ir-B (5-6%)	1250	1300
Rh-B (5-6%)	1250	1300
Ni-B (4-6%)	1200	1300
Ni-B (12%)	1100	—
Pt-B (4%)	1000	—
Pd-B (4%)	900	—
Ni-Si (30%)	1100	—

Поскольку для предложенных припоев полных фазовых диаграмм состояний не построено, проводился ряд исследований по уточнению состава их эвтектик.

Изучалась также кинетика растекания припоя по поверхности и заполнения паяемого зазора. С учетом полученных данных, температура пайки была выбрана на 50-100° выше температуры плавления припоя.

Поскольку выбор припоя и режимов пайки должен проводиться с учетом необходимости получения минимального воздействия материалов припоя на свойства катода, были проведены исследования глубины проникновения припоя в толщу материала губки и основного конструкционного материала – молибдена с помощью микрорентгеновского анализа.

Было установлено, что в режиме пайки проникновение Ni, Ru, Ir, Rh и Pt в вольфрам и молибден незначительное (5-7мкм) (Рис.6 а, б).

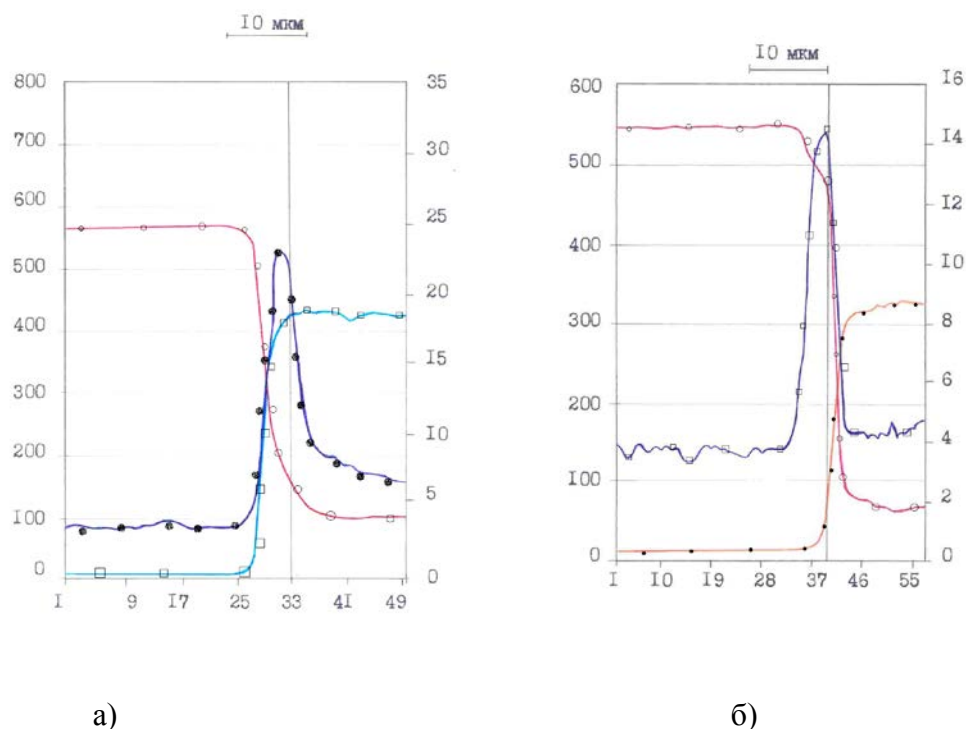


Рис.6. Распределение элементов на границе припоя и паяемого материала для систем: а) - W(-o-)-Rh(-□-)-B(-●-), б) – W(-o-)-Ir(-●-)-B(-□-). Для бора – ось ординат справа.

С другой стороны, в припое на всю его глубину (20-30мкм) растворяется молибден и вольфрам.

Такой характер взаимодействия этих металлов объясняется тем, что растворимость в молибдене и вольфраме указанных материалов припоя существенно меньше, чем растворимость самих молибдена и вольфрама в материалах припоя [15]. Бор, уходя из припоя, накапливается в приповерхностном слое вольфрама и молибдена толщиной 6-7мкм путем последовательного перехода от соединений бедных к более богатым бором: Mo_2B , MoB , MoB_2 , Mo_2B_5 , аналогично и с вольфрамом.

Таким образом, в результате процесса пайки состав припоя существенно изменяется: он насыщается тугоплавкими металлами вольфрамом и молибденом, из него уходит бор. Поэтому вторично расплавить паяные соединения при температуре пайки невозможно, даже нагревание до температуры 1700-1800°C не приводит к разрыву паяного шва.

Особое внимание уделено величине зазора. Он должен быть таким, чтобы происходило полное насыщение припоя спаиваемыми тугоплавкими металлами, и получался их согласованный спай с учетом различия коэффициентов теплового расширения.

Было установлено, что для выполнения этих условий оптимален зазор 6-10мкм в случае пайки эмиссионного тела на молибденовую траверзу; и 0,01мм при пайке эмиссионного тела на спираль.

Количество припоя (P_n), необходимое для заполнения зазора шириной Δ_n рассчитывалось по формуле (2):

$$P_n = \frac{\rho_n \Delta_n^2 \pi D}{2}, \text{ где} \quad (2)$$

ρ_n – насыпная плотность порошка припоя,

D – диаметр паяемых деталей.

Для исследования эмиссионных характеристик катодов использовались диоды с цилиндрическим анодом, для КВП – с цельным анодом, а для КПК – с анодом, разделенным на три секции. На среднюю секцию отбирался ток с однородно нагретой втулки, а на боковые секции анода – ток с катододержателей-нагревателей, находящихся в потоке активного вещества.

Для оценки эмиссионной способности КВП была изучена зависимость температуры втулки от температуры спирали, а также была измерена скорость испарения лантана и тория из втулок, содержащих эти металлы в количестве 6-7%. Эти данные в литературе отсутствуют, автором они получены впервые.

При выборе диапазона рабочих температур спирали КВП нужно исходить из следующего положения: температура спирали должна быть такой, чтобы втулка была разогрета до температуры, при которой скорость испарения активного вещества была бы достаточной для образования на спирали адсорбированной пленки, обеспечивающей требуемый уровень ее электронной эмиссии. На Рис.7 в качестве примера представлены зависимости скорости испарения тория из втулок W-Th и из пленок W-Th_{пл} [14] при различных относительных покрытиях. С учетом геометрического фактора температура втулки должна быть несколько увеличена, что на Рис.7 представлено пунктирной линией. Данные,

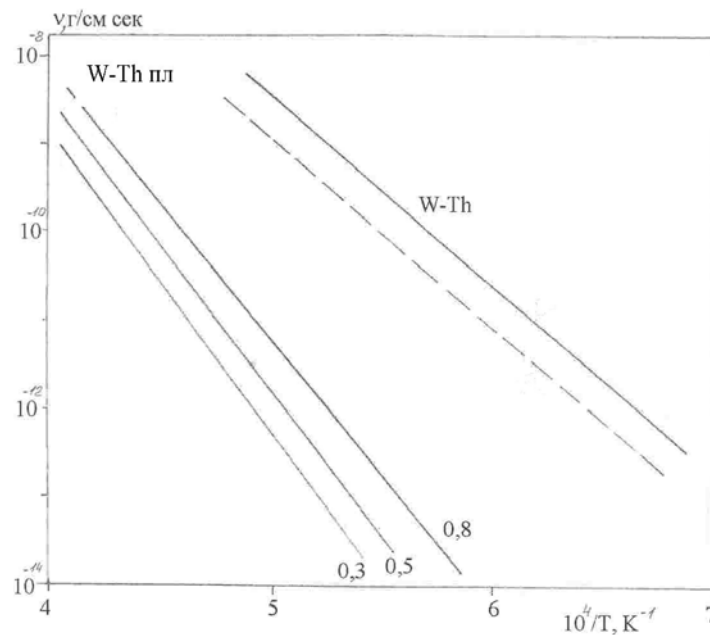


Рис.7. Зависимость скорости испарения Th от температуры для втулки W-Th и пленочной системы W-Th_{пл} при относительном покрытии 0,3; 0,5 и 0,8 от монослоя.

представленные на этом рисунке, позволяют по заданной температуре спирали, а, следовательно, и втулки, оценить концентрацию активного металла на ее поверхности, а значит, ее эмиссионную способность.

На Рис.8 представлена зависимость анодного тока от температуры спирали КВП с эмиссионными втулками W-Ba, W-La и W-Th, полученная экспериментально, а для W-Th также путем расчета (пунктирная кривая).

Удовлетворительное совпадение результатов экспериментального исследования и теоретических расчетов электронной эмиссии говорит о том, что

предложенная модель работы КВП адекватно отражает реальный механизм работы этого катода.

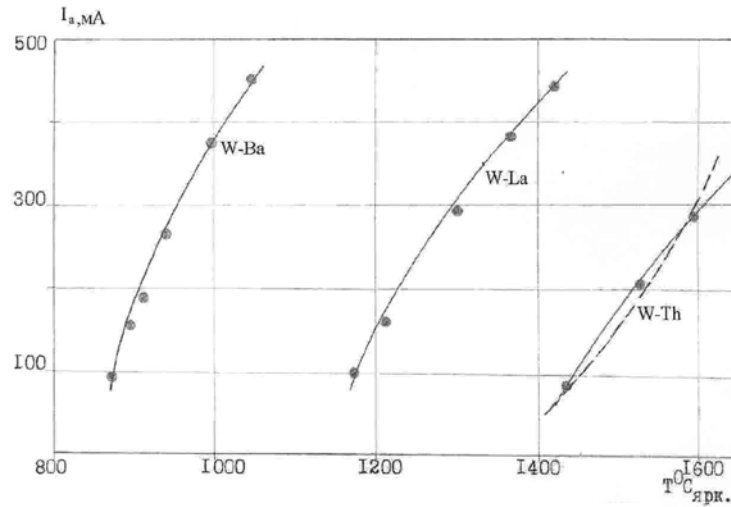


Рис.8. Зависимость анодного тока от температуры спирали КВП с эмиссионными втулками W-Ba, W-La и W-Th. Анодное напряжение 200 В.

Зависимость эмиссионного тока втулки от температуры для разных эмиссионных материалов представлена на Рис.9. В области тока насыщения этих характеристик определены работы выхода электронов для W-Ba – 1,9эВ; W-La – 2,7эВ и W-Th – 3,15эВ.

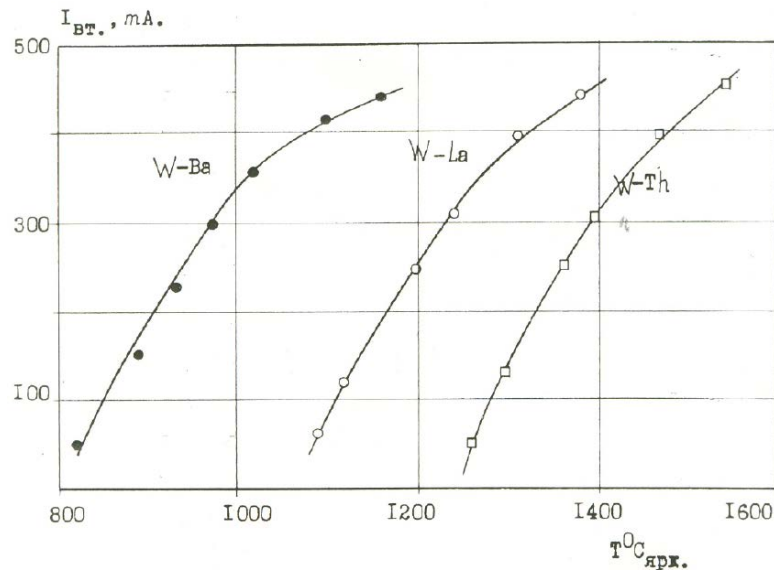


Рис.9. Зависимость термоэлектронной эмиссии катодных втулок W-Ba, W-La и W-Th для КПК от их температуры. Анодное напряжение 200 В.

Для боковых ветвей спирали зависимость эмиссии от температуры для КПК с эмиссионными втулками W-Ba, W-La и W-Th представлена на Рис.10.

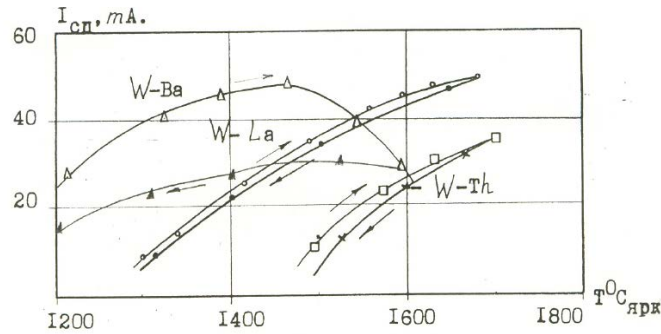


Рис.10. Зависимость термоэлектронной эмиссии спиралей КПК от их температуры с W-Ba, W-La и W-Th эмиссионными втулками. Анодное напряжение 200 В.

Из Рис.10 видно, что электронная эмиссия спирали, помещенной в поток активного вещества (Ba, La или Th), первоначально с увеличением температуры увеличивается; но поскольку при этом уменьшается и концентрация адсорбированного Ba, La или Th, то наступает момент, когда с увеличением температуры эмиссия падает. Каждая точка на кривых получена после 10-15 минут выдержки. Тем не менее, этого недостаточно для получения равновесной пленки эмиссионно-активного вещества на поверхности спирали – наблюдается гистерезис.

Стабильность эмиссионных параметров КВП при длительных испытаниях в диодах проверялась при повышенной температуре спиралей (ускоренный режим) для W-Ba - $1100^0C_{ярк}$, W-La - $1400^0C_{ярк}$, W-Th - $1700^0C_{ярк}$. Результаты этих испытаний представлены на Рис.11. Наилучшей стабильностью обладает КВП с втулкой W-Ba.

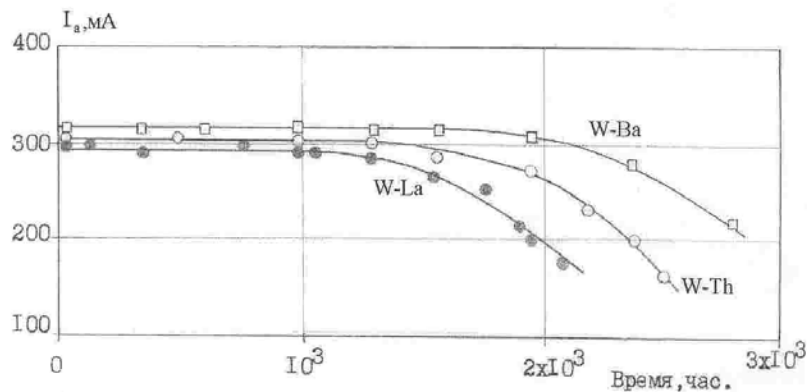


Рис.11. Зависимость анодного тока от времени испытаний КВП с эмиссионными втулками W-Ba, W-La и W-Th. Температура измерений соответственно $1000^0C_{ярк}$, $1300^0C_{ярк}$ и $1600^0C_{ярк}$. Температура испытаний на долговечность $1100^0C_{ярк}$, $1400^0C_{ярк}$ и $1700^0C_{ярк}$. Анодное напряжение 200 В.

Долговечность КПК испытывалась при температурах: для W-Ba - $1000^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$; W-La - $1200^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$ и W-Th - $1350^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$. Температуры спиралей при этом были соответственно $1300^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$; $1650^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$; $1880^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$. При этих температурах втулки обеспечивают необходимый рабочий ток магнетрона 280-300мА, а спирали – ток запуска магнетрона – не менее 20мА.

Результаты этих испытаний представлены на Рис.12(а, б). Видно, что при таком соотношении температур втулки и спирали, потока активных металлов для поддержания нужной для запуска магнетрона величины тока спирали ($\sim 20\text{мА}$) хватает на 500-1200 часов непрерывной работы катода.

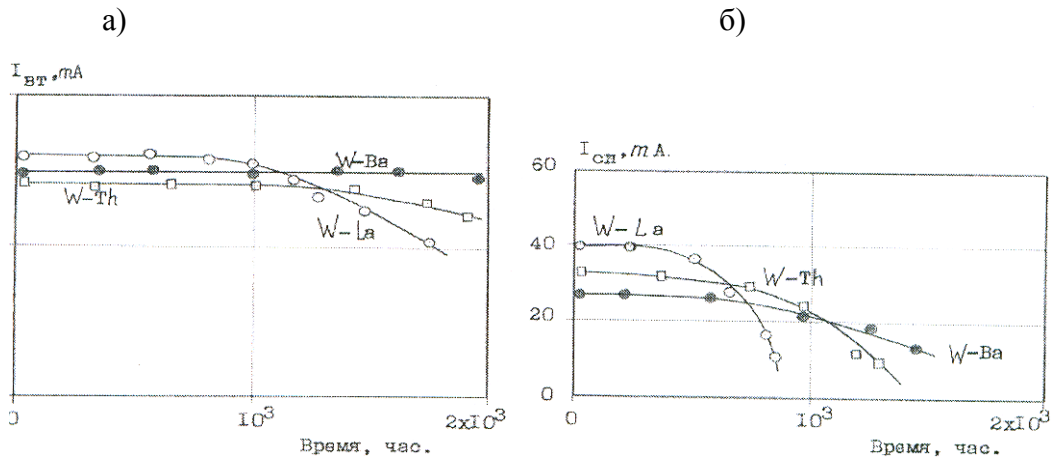


Рис.12. Стабильность термоэлектронной эмиссии втулок (а) и спиралей (б) при испытании КПК на долговечность. Температура втулок: W-Ba- $1000^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$, W-La - $1200^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$, W-Th- $1350^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$. Температура спиралей соответственно: $1300^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$, $1650^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$ и $1880^{\circ}\text{C}_{\text{яр}}$.

Ситуация коренным образом меняется при работе катода в магнетроне, когда втулка нагревается не только спиралью, но и обратной электронной бомбардировкой, и катод может работать без дополнительного подкала, а температура втулки оказывается больше температуры спирали.

Раздел пятый посвящен исследованиям работы катодов в магнетронах.

В этом разделе приведена методика исследований и электрическая схема установки для испытаний магнетрона. Для проведения исследований катодов в анодные блоки стандартных магнетронов были вмонтированы окна для пирометрирования.

В магнетронах исследованы слоисто-структурированные катоды (ССК), КВП с катодными втулками W-Ba и W-Th, которые показали наилучшие результаты при

их испытаниях на долговечность в диодах, и КПК с катодными втулками W-Va, W-La и W-Th, т.е. использовался весь набор исследованных эмиссионных материалов. Это позволило на примере КПК проследить влияние эмиссионных характеристик катодов на температурный режим их работы.

Показано, что зависимость между анодным током магнетрона и его мощностью в пределах ошибок измерений одинакова для различных типов катодов, хотя температура катода, необходимая для поддержания нужной величины анодного тока, существенно зависит от эмиссионных характеристик применяемого катода. Например, для КПК W-Va катода после запуска магнетрона температура скачком увеличивается от $870^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$ до $950^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$ и затем с увеличением мощности магнетрона постепенно возрастает до $1000^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$. При выключении накала мощность и анодный ток магнетрона не изменяется, при этом температура катода падает до $800\text{-}900^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$, а спиралей – до температур, при которых отсутствует видимое свечение (Рис.13):

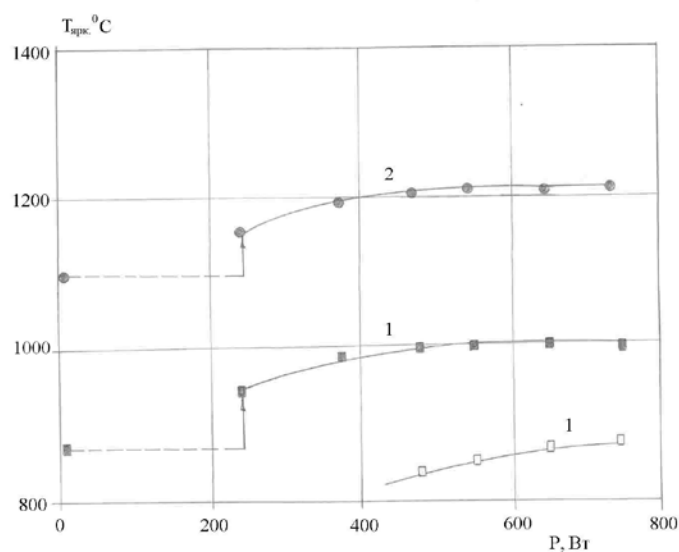


Рис.13. Зависимость температуры втулки КПК W-Va -■-(кривая 1) и спирали подогревателя-●- (кривая 2) от мощности магнетрона при мощности накала 13Вт, необходимой для запуска магнетрона, и зависимость температуры катода от мощности магнетрона -□- (кривая 1') после отключения накала подогревателя.

По температуре катода была оценена удельная мощность обратной электронной бомбардировки – $17,7\text{Вт}/\text{см}^2$, т.е. для магнетрона непрерывного

генерирования при его к.п.д. около 80%, мощность обратной электронной бомбардировки составляет 1,5% от генерируемой мощности магнетрона.

При запуске магнетрона с КПК W-La температура катодной втулки увеличивается от $975^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$ до $1170^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$ и при увеличении мощности магнетрона подрастает до $1300^{\circ}\text{C}_{\text{яр.}}$. После этого снижение дополнительного подкала позволяет снизить температуру катодной втулки приблизительно на 150°C без срыва генерации; температура спирали снижается на 180°C .

Исследования показали, что минимальный ток термоэлектронной эмиссии, обеспечивающий запуск магнетрона, равен 10-20 мА. Время выхода на стабильный режим работы отдельных элементов катода и работы магнетрона (время готовности) от мощности накала для КПК W-Ba представлено на Рис.14:

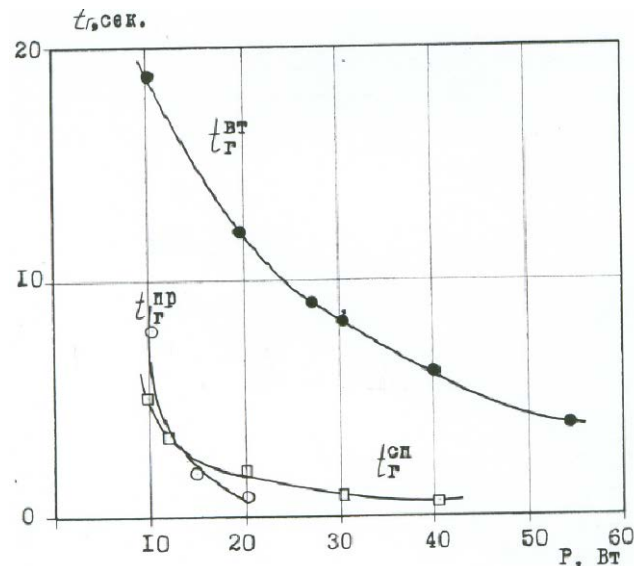


Рис. 14. Зависимость времени выхода на стабильный режим работы W-Ba втулки КПК, спирали подогревателя и времени готовности магнетрона от мощности накала катода.

Наблюдается естественная закономерность: с увеличением мощности накала время готовности уменьшается. Однако наиболее важным является другое – время готовности магнетрона $t_{\text{Г}}^{\text{ПД}}$ существенно меньше времени разогрева катодной втулки $t_{\text{Г}}^{\text{BT}}$.

Таким образом, механизм быстрого (2-3 сек) включения магнетрона с КПК в работу может быть представлен следующим образом. При подаче мощности накала, например, 20-40Вт, время готовности спиралей $t_{\text{Г}}^{\text{СП}}$ составляет 1-2 сек, при этом термоэлектронный ток спирали достаточен (более 20мА) для обеспечения запуска магнетрона. Дальнейший рост тока (практически мгновенно)

достигается за счет вторично-электронной эмиссии втулки. Полная стабилизация тепловых параметров втулки достигается за 5-6 сек. После этого можно отключить накал катода. При этом стабилизация температуры втулки достигается за 10-15 сек.

Для магнетронов с КПК с втулками, изготовленными из других эмиссионных материалов, зависимость времени их готовности от мощности накала представлена на Рис.15. На этом же рисунке представлена аналогичная зависимость для магнетрона со стандартным W-ThO₂-C катодом. Кривая, помеченная знаком АТЭК, получена для магнетрона, катод которого представлял

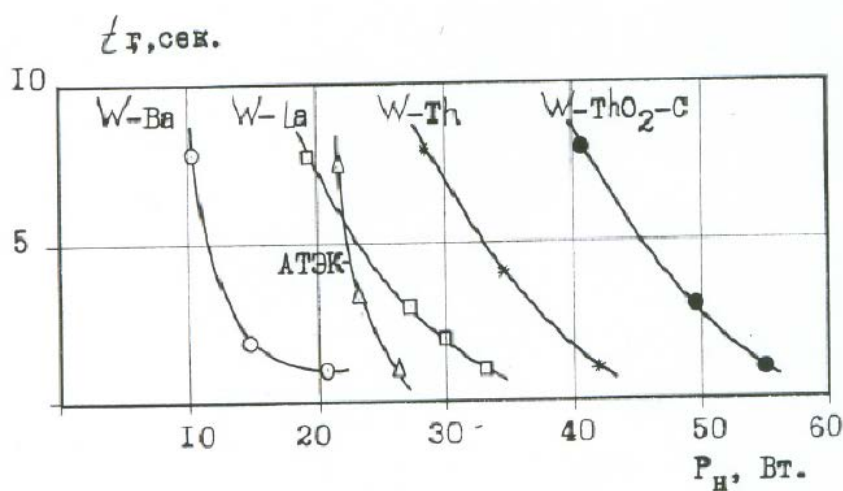


Рис.15. Зависимость времени готовности W-Ba, W-La и W-Th КПК, W-ThO₂-C катода и W-ThO₂-C катода с АТЭК от мощности накала.

собой спираль из W-ThO₂-C, к центральной части которой приварены лазером два автотермоэлектронных Ir-La катода. Такая конструкция позволила уменьшить мощность накала, которая обеспечивает необходимое время готовности, приблизительно в два раза.

На основе результатов исследования температурных режимов работы КПК в магнетронах и известных эмиссионных характеристик катодов найдена взаимосвязь величины плотности тока термоэлектронной эмиссии, необходимой для получения нужной величины анодного тока (300 мА), и другого параметра катода, характеризующего его вторично-электронную эмиссию – σ_{\max} (см.Рис.16).

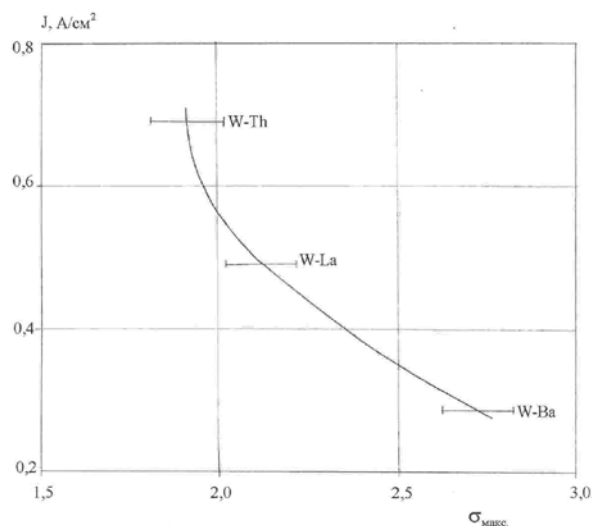


Рис. 16. Взаимосвязь между плотностью тока термоэлектронной эмиссии, полученной в результате измерения температуры катода при выходной мощности магнетрона 750 Вт, и σ_{max} для КПК W-Ba, W-La и W-Th.

Этот рисунок позволяет давать оценку температурного режима работы нового, ранее не применяемого, катода в исследованном типе магнетрона (а следовательно, его долговечность) на основе известных характеристик термо- и вторично-электронной эмиссии этого катода.

Испытания на долговечность показали, что нормам ТУ на прибор удовлетворяют в течение 4000 часов магнетроны с КВП W-Th, более 5000 часов с КПК W-Ba и W-Th, и более 9000 часов магнетроны с КВП W-Ba и ССК Ir-La.

Основные результаты работы

1. Исследовано взаимодействие расплавленного лантана с иридиевой губкой; показано, что глубина этого взаимодействия составляет 30-50 мкм и основным ограничивающим фактором более глубокого проникновения лантана в глубь иридиевой губки является образование интерметаллического соединения Ir_2La , которое препятствует взаимной диффузии иридия и лантана; на основе проведенных исследований предложен процесс нанесения многослойных иридий-лантановых покрытий; разработана технология изготовления таких слоисто-структурированных покрытий, применение которой для изготовления прямонакальных катодов позволило увеличить их долговечность в 2 - 3 раза;

2. Исследован процесс насыщения компактного иридия и иридиевой губки лантаном из его газовой фазы; технология поверхностного легирования иридиевой проволоки лантаном позволила создать острийные автотермоэлектронные катоды распределительного типа, которые при рабочей температуре 1000К обеспечивают отбор тока 20 – 30мА в постоянном режиме; 300 – 400мА в импульсном при долговечности 800 - 1000 часов,
3. Впервые предложен катод с вакуумным промежутком (КВП), разработана его конструкция, исследованы его эмиссионные и теплофизические свойства с использованием эмиссионных материалов W-Ba, W-La, W-Th, определен диапазон рабочих температур для каждого эмиссионного материала;
4. Предложен квазипрямокальный катод (КПК) с вакуумным промежутком, исследованы его свойства в экспериментальных приборах и в реальных магнетронах непрерывного генерирования; изучен механизм быстрого включения магнетронов с КПК; использование трех типов катодов W-Ba, W-La и W-Th с различными термо- и вторично-эмиссионными характеристиками позволило найти количественную связь между этими эмиссионными характеристиками и рабочей температурой катода в магнетроне;
5. Разработана технология пропитанных W-La и W-Th катодов, обеспечивающая высокую точность изготовления эмиссионного тела при минимальном количестве операций, связанных с механической обработкой эмиссионных катодных втулок; изучен процесс дезактивации (уменьшения γ -активности) W-Th заготовок в результате прогрева в вакууме и восстановления их радиоактивности в процессе дальнейшего хранения (процесс приближения к вековому равновесию); на основе этих исследований даны рекомендации по санитарно-гигиеническим мерам безопасной работы с катодами, содержащими торий;
6. Исследованы низкотемпературные припои (температура пайки не превышает возможные температуры нагрева катода в приборе) Ni-B; Ir-B; Rh-B; Pt-B; Pd-B, Ni-Si; выяснен механизм взаимодействия материала припоя с материалом паяемых деталей, в результате чего температура распая существенно превышает температуру пайки; исследована прочность паяных соединений к циклическим включениям накала и степени влияния материала припоя на эмиссионные характеристики катодов;
7. Изучена работоспособность разработанных катодов в магнетронах непрерывного генерирования, показано, что КВП W-Ba и ССК Ir-La

обеспечивают нормы ТУ на прибор ($P_{\text{вых.}}$ – не менее 750 Вт, к.п.д. – не менее 70%, время готовности не более 3 сек.) в течение более 9000 часов.

В приложении описана конструкция катодно-подогревательного узла для мощного многолучевого клистрона, в изготовлении которого использована разработанная автором технология низкотемпературной пайки отдельных эмиттеров в единую обойму. Конструкция катодного узла в основных своих элементах идентична ранее разработанной [16]. Применение высокотемпературной пайки, например, платиной в этой конструкции возможно только в том случае, если вольфрамовая губка не содержит активного вещества.

Применение низкотемпературных припоев расширяет возможности крепления деталей пайкой. Проводя процесс в вакууме, можно крепить уже пропитанные активным веществом и покрытые пленкой осмия эмиттеры, а также детали, содержащие тантал или гафний.

Пайка позволяет избежать недостатков механических способов крепления (ослабление контакта между эмиттерами и катододержателем в процессе тепловых циклических нагрузок) и лазерной сварки (охрупчивание места сварки, приводящее к появлению трещин в сварочном шве).

Испытания на цикличность включения накала (3000 циклов), выполненные в диапазоне температур $1050-1150^{\circ}\text{C}_{\text{ярк.}}$ показали, что стабильность геометрических параметров паяных соединений сохраняется в пределах 2%, а изменения температуры не наблюдается (точность измерения $\pm 5^{\circ}\text{C}$).

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Spiral cathodes for microwave heating magnetrons / B.Ch.Djubua, V.N.Ilyin, O.V.Polivnikova, E.M.Zemchikhin // Proceedings of the International Vacuum Electron Sources.- 1996.- P.99.
2. Эмиссионные свойства и долговечность металлопористых катодов/ Б.Ч.Дюбуа, Е.М.Земчихин, А.П.Макаров, О.К.Култашев, Е.Д.Куранова, О.В.Поливникова // Радиотехника и электроника.- 1991.- Вып.5.- С.985.

3. Авторское Свидетельство РФ на полезную модель №24320. Н 01 J 1/20, В 23 К 35/30. Катодно-подогревательный узел для многоручевых электронных приборов/ Поливникова О.В.- Приоритет от 29.12.2001.
4. Катоды спиральной формы для магнетронов СВЧ-нагрева / О.В.Поливникова, Е.М.Земчихин // Электронная техника. Сер.СВЧ-техника. -1996.- Вып. 1(467).
5. Effective tungsten-thorium cathodes/ В.Сh.Djubua., О.V.Polivnikova // Extended Abstracts of the Second International Vacuum Electron Sources Conference AIST-Tsukuba. Tsukuba. Japan.- 1998.-P145.
6. Поливникова О.В. Вольфрамториевые эффективные катоды // Электронная техника. Сер. СВЧ-Техника.- 1999.- Вып. 1(473).
7. Quasidirectly heated cathode for magnetrons/ В.Сh.Djubua, О.V.Polivnikova // 2000 IEE International Vacuum Electron Sources Conference. Orlando. Florida.- 2000.- P.33.
8. Stratum-like structured metal alloy cathode/ В.Сh.Djubua, О.V.Polivnikova // Appl. Surface Science.- 2003.- V.215.- Issues 1-4.- P.242-248.
9. Патент РФ на полезную модель № 39223. 7 Н 01 J 1/20, В 23 К 35/30. Прямокальный катод для электронных приборов магнетронного типа / Поливникова О.В. -Приоритет от 20.11.2002.
10. Патент РФ на изобретение №2225654. Н 01 J 1/20, В23К 35/30. Автотермоэлектронный катод /Поливникова О.В.- Приоритет от 28. 02. 2002.
11. Металлосплавной катод спиральной формы для магнетронов СВЧ-нагрева./ Б.С.Дюбуа, Е.М.Земчихин, О.К.Култашев, А.П.Макаров, О.В.Поливникова.// XXII Конференция по эмиссионной электронике –Москва-1994-Т.1-с.5.
12. Патент РФ на изобретение №2278010 В23К 35/30. Припой для соединения элементов катодно-подогревательного узла./ О.В.Поливникова.-Приоритет от 18.08.04.
13. Multibeam cathode for electron devices./ Djubua В.Сh., Polivnikova О.V.// Proceedings of the 5-th International Vacuum Electron Sources Conference, Beijing-2004-p.135.
14. Quasi-directly heated cathode for magnetron./ Djubua В.Сh., Polivnikova О.V.// Proceeding of the 5-th International Vacuum Electron Sources Conferens, Beijing-2004-p.177.

Литература.

1. Развитие мощных СВЧ-приборов и устройств на их основе./ В.Н.Макаров, А.В.Тебекин.//Сборник статей под редакцией И.В.Лебедева «Генераторы и усилители СВЧ». Изд. «Радиотехника»-2005-с.41.
2. Современное состояние и тенденции развития магнетронов для СВЧ-нагрева в промышленности и медицине./О.А.Морозов, И.В.Соколов// Электронная техника, Сер. 1-2000-Вып.2-с.3.
3. Состояние и тенденции развития бытовых СВЧ-печей/ Э.Д.Шлифер, А.И.Пипко, Ю.А.Пипко.// Электронная техника, Сер.1-2000-Вып.2.- с.18.
4. Э.А.Гельвич. Экспериментальные данные о влиянии эмиссионных свойств катода на работу импульсного магнетрона.// Труды НИИ-1954-Вып.3(18)-с.64.
5. M.F.Kopylov. Design and technology features of heating-free magnetrons with auto-emission excitation.// Proceedings of the Fifth International Vacuum Microelectronics Conference, New York-1993-p.491.
6. Металлосплавной прямонакальный катод спиральной формы./ Б.Ч.Дюбуа, В.К.Лысенко.// Электронная техника, Сер.1, Электроника СВЧ-1980-Вып.10, с.28.
7. Технология покрытия губчатых оксидных катодов плазменным методом./ Л.Н.Зубов, Ю.А.Потапов, В.А.Смирнов.// Электронная техника, Сер.1, Электроника СВЧ-1969-Вып.12-с.128.
8. Технология горячего и холодного плакирования в приборостроении./ В.П.Марин, А.П.Коржавый, Н.В.Яранцев.// Научные технологии, т.4, №2-2003-с.26.
9. Новая технология изготовления импрегнированных катодов./ А.А.Лучин, А.А.Корнюхин, А.Л.Шапиро.// Научные технологии, т.4, №2-2003-с.20.
10. Тонкопленочные технологии как средства повышения и стабилизации эмиссионных свойств катодных материалов для мощных ЭВП СВЧ./ В.П.Марин, Н.П.Есаулов, Ю.В.Меньшенин, А.П.Реутов.// Научные технологии, т.4, №2-2003-с.17.
11. Исследование металлопористых катодов с высокими токоотборами в дуговом разряде./ В.П.Марин, Ю.В.Меньшенин.// Научные технологии, т.2, №4-2001-с.33.

12. В.Н.Шредник. Теория автоэлектронной эмиссии.// Сборник статей под ред. М.И.Елинсона, Москва, Изд. «Советское радио»-1974-с.171.
13. Thermionic emission, field emission and the transition region.// E.L.Marphy, R.N.Good, Phys. Rev., v.102, №6-1956-p.1464.
14. Данфорс. Десорбция тория из монослоя.// Сборник «Техника электронных ламп», Изд. Иностранной литературы, Москва-1963-с.274.
15. Благородные металлы.// Справочник под ред. Е.М.Савицкого., Москва, Изд. «Металлургия»-1984.
16. Многоэмиттерные катодно-подогревательные узлы с металлопористыми катодами, устойчивые к термоциклам./ Масленников О.Ю., АбановичС.А.// Электронная техника., Сер. СВЧ-техника, Вып.2(466)-1995-с.23-30.

Подписано в печать (число)

Формат 60x84x/16. Объем 1 усл.-печ.л.

Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток-Аудио Интернэшнл»

