

Энциклопедия катода бариевого вольфрама

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Мировой лидер в области интеллектуального производства для вольфрамовой,
молибденовой и редкоземельной промышленности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с полной собственностью и независимым юридическим лицом, созданная CHINATUNGSTEN ONLINE, занимается продвижением интеллектуального, интегрированного и гибкого проектирования и производства вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета. CHINATUNGSTEN ONLINE, основанная в 1997 году с www.chinatungsten.com в качестве отправной точки — первого в Китае веб-сайта с продукцией из вольфрама высшего уровня — является пионерской компанией электронной коммерции в стране, сосредоточенной на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Используя почти три десятилетия обширного опыта в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP унаследовала исключительные проектные и производственные возможности своей материнской компании, превосходное обслуживание и международную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области вольфрамовых химикатов, вольфрамовых металлов, твердых сплавов, высокоплотных сплавов, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов по вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков, с более чем миллионом страниц новостей, цен и анализа рынка, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами. С 2013 года ее официальный аккаунт WeChat "CHINATUNGSTEN ONLINE" опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря совокупным посещениям кластера ее веб-сайта и официального аккаунта, достигающим миллиардов раз, он стал признанным мировым и авторитетным информационным центром для отраслей вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по тенденциям рынка.

Основываясь на технологиях и опыте CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами проектирует и производит вольфрамовые и молибденовые изделия с определенным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Она предлагает комплексные услуги по полному процессу, начиная от открытия пресс-формы, опытного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству для более чем 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий более чем 130 000 клиентов по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP еще больше углубляет интеллектуальное производство и интегрированные инновации вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета.

Доктор Ханнс и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и опубликовали знания, технологии, анализ цен на вольфрам и рыночных тенденций, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Доктор Хан, имеющий более чем 30-летний опыт с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является известным экспертом в области вольфрамовой и молибденовой продукции как на внутреннем, так и на международном уровне. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и высококачественной информации для отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов рынка, завоевывая широкую похвалу в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услуг.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Содержание

Предисловие

Цель и значение

Обзор структуры книги

Целевая аудитория

Глава 1: Обзор катодов с бариевым вольфрамом

1.1 Определение и основная концепция бариевого вольфрамового катода

1.1.1 Определение бариевого вольфрамового катода

1.1.2 Сравнение горячего катода и холодного катода

1.1.3 Сравнение бариевых вольфрамовых катодов с другими тепловыми катодами

1.2 Историческое развитие катода из бария и вольфрама

1.2.1 Происхождение и техническая эволюция бариевых вольфрамовых катодов

1.2.2 Ключевые вехи и технологические прорывы

1.3 Области применения бариевых вольфрамовых катодов

1.3.1 Вакуумная электроника

1.3.2 Конкретные виды использования в промышленности и научных исследованиях

1.3.3 Междоменный потенциал

Глава 2: Материаловедение бариевых вольфрамовых катодов

2.1 Вещественный состав бариевого вольфрамового катода

2.1.1 Химические и физические свойства пористой вольфрамовой матрицы

2.1.2 Свойства и соотношения соединений бария

2.1.3 Влияние присадок на показатели выбросов

2.2 Процесс получения катода из бария и вольфрама

2.2.1 Получение пористой вольфрамовой матрицы: порошковая металлургия и контроль пор

2.2.3 Процесс пропитки соединений бария: приготовление раствора и параметры пропитки

2.3 Микроструктура и свойства бариевых вольфрамовых катодов

2.3.1 Анализ пористости и структуры пористой вольфрамовой матрицы

2.3.2 Взаимосвязь между морфологией поверхности и эмиссионными характеристиками активного слоя бария

Глава 3: Принцип работы и механизм запуска

3.1 Теория термоэмиссионной эмиссии

3.1.1 Уравнение Ричардсона-Душмана

3.1.2 Эффект Шоттки и излучение, усиленное полем

3.1.3 Перспективы квантовой механики

3.2 Эмиссионные характеристики бариевых вольфрамовых катодов

3.2.1 Механизм формирования функции малой мощности

3.2.2 Динамическое поведение и термическая стабильность активных слоев

3.3 Факторы, влияющие на характеристики выбросов бариевого вольфрамового катода

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 Рабочая среда
- 3.3.2 Механизм старения и токсические эффекты
- 3.3.3 Анализ режима отказа

Глава 4: Производство и технология обработки бариевого вольфрамового катода

- 4.1 Формование с пористой вольфрамовой матрицей
 - 4.1.1 Процесс просеивания и прессования вольфрамового порошка
 - 4.1.2 Оптимизация пористости и механической прочности
- 4.2 Пропитка и активация соединений бария
 - 4.2.1 Процесс пропитки: рецептура соединения бария и условия пропитки
 - 4.2.2 Процесс активации: термическая обработка и формирование поверхностно-активного слоя
- 4.3 Контроль качества и испытания бариевых вольфрамовых катодов
 - 4.3.1 Метод испытаний для передачи характеристик
 - 4.3.2 Критерии оценки согласованности и надежности
 - 4.3.3 Анализ и улучшение сбоев

Глава 5: Применение катода из бария и вольфрама

- 5.1 Вакуумная электроника
 - 5.1.1 Микроволновая трубка
 - 5.1.1.1 Магнетрон: используется в радиолокационном и микроволновом нагревательном оборудовании
 - 5.1.1.2 ЛБВ: высокочастотная связь и спутниковые усилители
 - 5.1.1.3 Клистроновая трубка: мощный радар и ускоритель частиц
 - 5.1.2 Рентгеновские трубки
 - 5.1.2.1 Оборудование для медицинской визуализации
 - 5.1.2.2 Промышленный неразрушающий контроль
 - 5.1.3 Другие вакуумные устройства
- 5.2 Научные инструменты
 - 5.2.1 Электронный микроскоп
 - 5.2.2 Масс-спектрометр: высокочувствительный источник ионов
 - 5.2.3 Оборудование для анализа поверхности
- 5.3 Промышленные и коммуникационные приложения
 - 5.3.1 Радиолокационная система
 - 5.3.2 Коммуникационное оборудование
 - 5.3.3 Трубка вакуумного переключателя
- 5.4 Аэрокосмическая и оборонная промышленность
 - 5.4.1 Космические электронные устройства
 - 5.4.2 Система электронного противодействия
- 5.5 Новые и междоменные приложения
 - 5.5.1 Генератор терагерцовых волн
 - 5.5.2 Ионные двигатели

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.3 Эксперименты по физике высоких энергий

5.5.4 Биомедицинские приложения

Глава 6: Оптимизация и улучшение характеристик катода из бариевого вольфрама

6.1 Повышение эффективности запуска

6.1.1 Оптимизация пористой структуры пористой вольфрамовой матрицы

6.1.2 Рецептура и технология легирования новых соединений бария

6.1.3 Применение нанотехнологий

6.2 Продление срока службы

6.2.1 Процесс борьбы с отравлениями

6.2.2 Повышение термической стабильности и механической прочности

6.3 Адаптация к окружающей среде

6.3.1 Производительность в экстремальных условиях

6.3.2 Низкое энергопотребление и экологичное производство

6.4 Разумный замысел

Глава 7: Вызовы и будущее развитие

7.1 Текущие технические узкие места

7.1.1 Стоимость материалов и сложность подготовки

7.1.2 Стабильность производительности и проблемы массового производства

7.1.3 Проблемы в цепочке поставок

7.2 Конкурс новых технологий

7.2.1 Технология холодного катода

7.2.2 Прочие тепловые катоды

7.2.3 Анализ конкурентных преимуществ бариевых вольфрамовых катодов

7.3 Будущие направления исследований

7.3.1 Исследование новых материалов и процессов

7.3.2 Интеллектуальное и адаптивное проектирование катодов

7.3.3 Междисциплинарные исследования

Глава 8: Стандарты катодов с барием и вольфрамом

8.1 Международные и отраслевые стандарты

8.1.1 Международные стандарты, относящиеся к бариевым вольфрамовым катодам

8.1.2 Отраслевые стандарты, относящиеся к бариевым вольфрамовым катодам

8.2 Технические характеристики катода с барием и вольфрамом

8.2.1 Требования стандартизации по ключевым параметрам

8.2.2 Методы испытаний и процессы верификации

8.3 Стандарты производства и контроля качества катода с барием-вольфрамом

8.3.1 Технические требования к чистоте материала и процессу подготовки

8.3.2 Требования к согласованности и отслеживаемости

8.4 Стандарты охраны окружающей среды и безопасности

8.4.1 Требования к безопасности обработки и охране окружающей среды для соединений

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

бария

8.4.2 Руководство по соблюдению нормативных требований в производстве и использовании

8.4.3 Требования к утилизации отходов

Приложение

A. Глоссарий

B. Ссылки

C. Стандарты и спецификации испытаний

Международные стандарты

Отраслевой стандарт

Китайские национальные и отраслевые стандарты

D. Поставщики и ресурсы

CTIA GROUP LTD Введение

CTIA GROUP LTD Бариевый вольфрамовый электрод Похожие веб-сайты

E. Индекс

Указатель ключевых слов

Тематический указатель



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Предисловие

Цель и значение

Бариевый вольфрамовый катод, как эффективный термоизлучающий материал, занимает центральное положение в области современной электронной техники. Его основные свойства — низкая рабочая функция, высокая плотность эмиссионного тока, превосходная термическая стабильность и длительный срок службы — обусловлены гениальным сочетанием пористой вольфрамовой матрицы с соединением бария, таким как алюминат бария и кальция. Эта уникальная конструкция делает бариевые вольфрамовые катоды идеальными для вакуумных электронных устройств (таких как микроволновые трубки, рентгеновские трубки и фотоумножители) и широко используются в передовых областях, таких как аэрокосмическая промышленность, медицинская визуализация, системы связи, научные инструменты и эксперименты по физике высоких энергий. Бариевые вольфрамовые катоды не только способствуют непрерывному развитию технологий вакуумной электроники, но и обеспечивают потенциальную поддержку для новых технологий, таких как генераторы терагерцовых волн и ионные двигатели.

Эта книга предназначена для того, чтобы предоставить читателям всеобъемлющий и систематический справочный материал по бариевым вольфрамовым катодам, охватывающий материаловедение, производственный процесс, принцип работы, области применения и будущие тенденции развития. Мы надеемся раскрыть его важнейшую роль в высокопроизводительной электронике, углубившись в технические детали бариево-вольфрамовых катодов, одновременно исследуя их потенциал для инноваций в междисциплинарных областях.

Обзор структуры книги

Эта книга имеет четкую структуру, от основы к применению, от теории к практике, логическую строгость, слой за слоем, разделенную на восемь глав и приложений, полностью охватывающих все аспекты бариевых вольфрамовых катодов:

- **Глава 1: Обзор катодов с бариевым вольфрамом**

Эта глава закладывает основу для книги, знакомя с определением, основными понятиями и сравнениями катодов из бария и вольфрама и их сравнением с другими горячими и холодными катодами, разбирая исторический контекст их эволюции от зарождения до современных технологий и описывая широкий спектр их применения в вакуумных электронных устройствах, промышленности и научных исследованиях.

- **Глава 2: Материаловедение катодов бариевого вольфрама**

В этой главе подробно рассматривается состав материала и процесс подготовки катодов из бариевого вольфрама, анализируются химические и физические свойства пористых вольфрамовых матриц, соединений и добавок бария, а также выявляется

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

внутренняя взаимосвязь между микроструктурой (например, пористостью и морфологией поверхности) и эмиссионными свойствами.

- **Глава 3: Принцип работы и механизм выброса**

Эта глава начинается с теории термоэмиссионной эмиссии и сочетает в себе уравнение Ричардсона-Душмана, эффект Шоттки и квантовую механику для детального анализа механизма формирования низкой рабочей функции бариевого вольфрамового катода, динамического поведения активного слоя и факторов окружающей среды, влияющих на характеристики излучения.

- **Глава 4: Производство и технология обработки бариевого вольфрамового катода**

В этой главе основное внимание уделяется производственному процессу, охватывающему формирование пористой вольфрамовой матрицы методом порошковой металлургии, процесс пропитки и активации соединений бария, а также методы тестирования и контроля качества эмиссионных свойств, обеспечивая техническую основу для промышленного производства.

- **Глава 5: Применение катода из бария и вольфрама**

В этой главе систематически рассматриваются конкретные области применения бариевого вольфрамового катода в вакуумных электронных устройствах (таких как микроволновые трубки, рентгеновские трубки), научных инструментах (таких как электронные микроскопы, масс-спектрометры), промышленных коммуникациях, аэрокосмической промышленности и новых областях, подчеркивая его потенциал в различных областях.

- **Глава 6: Оптимизация и улучшение характеристик катода из бариевого вольфрама**

В этой главе обсуждаются стратегии повышения эффективности выбросов, продления срока службы и повышения адаптивности к окружающей среде, включая передовые методы, такие как новые рецептуры соединений бария, нанотехнологические приложения и интеллектуальное проектирование.

- **Глава 7: Вызовы и перспективы развития**

В этой главе анализируются текущие технические узкие места (такие как материальные затраты, стабильность производительности) и проблемы конкурирующих технологий, таких как холодные катоды, а также прогнозируется будущее направление новых материалов, новых процессов и междисциплинарных исследований (таких как искусственный интеллект и квантовые вычисления).

- **Глава 8: Стандарты катодов с барием и вольфрамом**

В этой главе представлены международные и отраслевые стандарты, относящиеся к бариевым и вольфрамовым катодам, охватывающие технические характеристики, методы испытаний, производственные процессы и требования к экологической безопасности, а также рекомендации по стандартизированному производству.

- **Приложения и указатели**

Приложения включают глоссарии, ссылки, стандарты испытаний, технические характеристики и информацию о поставщиках (например, CTIA GROUP LTD) для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

удобного справочного и глубокого исследования. Раздел индексации содержит указатели ключевых слов и тем для быстрого таргетинга контента.

Дизайн содержания этой книги сосредоточен на сочетании теории и практики, с углубленным обсуждением фундаментальной науки и подробным руководством по инженерным приложениям, стремясь предоставить читателям всестороннюю и практическую систему знаний.

Целевая аудитория

Эта книга предназначена для широкого круга читателей, включая, но не ограничиваясь:

- **Материаловеды:** обращают внимание на состав материала, микроструктуру и процесс подготовки бариевых вольфрамовых катодов, а также стремятся к прорывам в новых материалах и процессах.
- **Инженер-электронщик:** Занимаясь проектированием и разработкой вакуумных электронных устройств, необходимо овладеть принципом работы и технологией изготовления бариевого вольфрамового катода.
- **Исследователи в области технологий вакуумной электроники:** сосредоточьтесь на оптимизации производительности, расширении применения и стандартизации тепловых катодов.
- **Промышленные техники:** применяют бариевые вольфрамовые катоды при производстве и обслуживании микроволновых трубок, рентгеновских трубок, радиолокационных систем и другого оборудования.
- **Междисциплинарные новаторы:** изучение потенциала бариевых вольфрамовых катодов в новых областях, таких как терагерцовые технологии, ионные двигатели, биомедицина и многое другое.
- **Преподаватели и студенты колледжей и университетов:** Эта книга может быть использована в качестве учебника для выпускников или справочника по специальностям в области материаловедения, электронной инженерии, вакуумных электронных технологий и т. д., чтобы обеспечить поддержку академических исследований и преподавания.

Независимо от того, являетесь ли вы новичком в катодах бариевого вольфрама или экспертом с многолетним опытом работы в смежных областях, эта книга призвана предоставить вам четкую основу знаний, глубокие технические знания и практические руководства по применению.

Запись признаков и значений

Эта книга фокусируется на следующих особенностях процесса написания, чтобы обеспечить баланс ее академической ценности и практичности:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Комплексность и систематичность**

Эта книга всесторонне охватывает все аспекты катодов из бария и вольфрама от базовой теории до передовых приложений, от материаловедения до промышленных стандартов, и создает полную систему знаний, чтобы читатели могли систематически усвоить соответствующий контент.

- **Совмещение теории и практики**

Глубоко излагая теорию термоэмиссионной эмиссии и принципы материаловедения, эта книга подробно описывает производственные процессы, методы тестирования производительности и практические примеры применения с учетом потребностей академических исследований и инженерной практики.

- **Дальновидность и инновации**

Эта книга не только обобщает существующие технические достижения бариевых вольфрамовых катодов, но и дает представление о будущих направлениях их развития в области нанотехнологий, интеллектуального дизайна и междисциплинарных исследований (таких как искусственный интеллект и квантовые вычисления), предоставляя читателям инновационное вдохновение.

- **Полезность и работоспособность**

Глоссарий, технические характеристики, стандарты испытаний и информация о поставщиках (например, CTIA GROUP LTD) в приложении предоставляют читателям удобные справочные ресурсы. Дизайн индекса способствует быстрому нацеливанию на ключевой контент и повышает его полезность.

Благодаря этой книге читатели могут не только глубоко понять научно-техническую коннотацию бариевых вольфрамовых катодов, но и черпать из них вдохновение для продвижения инноваций и разработок в технологии вакуумной электроники и смежных областях. Мы считаем, что барий-вольфрамовые катоды, как классическая и динамичная технология, будут продолжать играть важную роль в будущих технологических волнах, предоставляя бесконечные возможности для высокопроизводительных электронных устройств и междисциплинарных приложений.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 1: Обзор катодов с бариевым вольфрамом

Являясь высокоэффективным термоэмиссионным материалом, бариевый вольфрамовый катод занимает незаменимое место в области вакуумной электроники и высоких технологий. Его уникальная пористая вольфрамовая матрица и структура, пропитанная соединением бария, придают ему характеристики низкой рабочей функции, высокой плотности эмиссионного тока, отличной термической стабильности и длительного срока службы, что делает его основным компонентом микроволновых трубок, рентгеновских трубок, электронных микроскопов и другого оборудования. Цель этой главы – предоставить читателям всестороннее введение в бариевые вольфрамовые катоды, охватывающее их определение и основные понятия, исторический контекст развития и широкий спектр областей применения, закладывая основу для углубленного обсуждения в последующих главах. Сравнивая различия в производительности между бариевыми вольфрамовыми катодами и другими типами катодов, мы разберем ключевые вехи их технологической эволюции и посмотрим на их потенциал в традиционных и новых областях.

1.1 Определение и основная концепция бариевого вольфрамового катода

1.1.1 Определение бариевого вольфрамового катода

Бариевый вольфрамовый катод представляет собой катод, основанный на принципе термоэмиссионной эмиссии, а его основная структура состоит из пористой вольфрамовой матрицы с высокой пористостью и пропитанных соединений бария, таких как алюминат кальция бария, алюминат Ва-Са-алюминат. Пористая вольфрамовая матрица получена по технологии порошковой металлургии и имеет однородную пористую структуру, что позволяет эффективно адсорбировать и хранить соединения бария. В высокотемпературных условиях эксплуатации соединения бария путем термического разложения выделяют реакционноспособные атомы бария, которые диффундируют на поверхность через поры пористой вольфрамовой матрицы, образуя одноатомный слой с низкой рабочей функцией (рабочая функция около 1,1—1,5 эВ). Эта функция с низким энергопотреблением значительно снижает энергию, необходимую для убегания электронов, что позволяет барий-вольфрамовым катодам обеспечивать высокую плотность эмиссионных токов и хорошо работать в сценариях с высокой мощностью, высокой частотой и высокой надежностью.

Конструкция бариевых вольфрамовых катодов сочетает в себе высокую температуру плавления вольфрамовой матрицы (около 3422 °C), превосходную химическую стабильность и низкие эксплуатационные преимущества соединений бария, что делает их особенно подходящими для вакуумных электронных устройств, требующих стабильного источника электронов, таких как микроволновые трубки, рентгеновские трубки и научные приборы. Его устойчивость к отравлению и термическая стабильность еще больше повышают его пригодность в сложных условиях, таких как высокий вакуум или высокая радиация.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.1.2 Сравнение горячего катода и холодного катода

Источники электронной эмиссии в основном делятся на две категории: горячие катоды и холодные катоды, и существуют существенные различия в принципах их работы, эксплуатационных характеристиках и сценариях применения. Ниже приведено подробное сравнение:

- **Термические катоды (например, бариевые вольфрамовые катоды)**

Горячий катод нагревает материал до высокой температуры, так что электроны получают достаточную энергию для преодоления поверхностного барьера и достижения термоэмиссионной эмиссии. К его основным особенностям можно отнести:

- **Высокая плотность передающего тока:** достигает от нескольких ампер до десятков ампер на квадратный сантиметр, подходит для мощных устройств, таких как микроволновые трубки и рентгеновские трубки.
- **Стабильность и зрелый процесс:** После почти ста лет развития технология тепловых катодов имеет зрелые производственные процессы и высокую стабильность производительности, а также широко используется в промышленности и научных исследованиях.
- **Длительный срок службы:** бариевые вольфрамовые катоды могут работать от тысяч до десятков тысяч часов при правильных условиях, отвечая высоким требованиям надежности. Ограничениями являются необходимость непрерывного нагрева, что приводит к высокому энергопотреблению, высокие температуры, которые могут вызвать термическое напряжение или старение материала, а также высокие требования к вакуумной среде (обычно 10^{-6} Па или менее) для предотвращения загрязнения поверхности.

- **Холодные катоды (например, полевые эмиссионные катоды, катоды на основе углеродных нанотрубок)**

Холодные катоды индуцируют туннельную эмиссию электронов через сильные электрические поля (обычно 10^7 – 10^9 В/м) без работы при высоких температурах. К его основным особенностям можно отнести:

- **Низкое энергопотребление:** не требует нагрева, подходит для устройств с низким энергопотреблением, таких как портативная электроника.
- **Быстрый отклик:** электронная эмиссия имеет короткое время отклика (наносекунды), что делает ее пригодной для высокочастотных или импульсных приложений.
- **Потенциал миниатюризации:** компактен и подходит для миниатюрных устройств, таких как дисплеи полевого излучения или микрорентгеновские источники. Однако холодные катоды имеют низкую плотность тока излучения (обычно на уровне мА/см²), чрезвычайно высокие требования к однородности электрического поля и чистоте поверхности, подвержены

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

загрязнению или повреждению, имеют сложный производственный процесс и высокую стоимость.

В следующей таблице приведены характеристики горячих катодов по сравнению с холодными катодами (данные основаны на общих технических параметрах):

Характерный	Тепловые катоды (например, бариевые вольфрамовые катоды)	Холодный катод (например, полевой эмиссионный катод)
Как это работает:	Термоэмиссионная эмиссия (нагретая до высокой температуры)	Индукцированное полем туннелирование электронов (сильное электрическое поле)
Рабочая функция (eV)	1,1–1,5 (бариевый вольфрамовый катод)	4–5 (типичное значение)
Плотность тока излучения	10–20 А/см ²	0,01–1 А/см ²
Рабочая температура	900–110850°C	комнатная температура
Продолжительность жизни	Десятки тысяч часов	Тысячи часов (в зависимости от окружающей среды)
Требования к вакууму	Высокий (10 ⁻⁶ Па или менее)	Экстремально высокий (10 ⁻⁸ Па или менее)
Ключевые преимущества	Высокая плотность тока и длительный срок службы	Низкое энергопотребление, быстрый отклик
Основные ограничения	Требуется высокое энергопотребление и высокая температура	Низкая плотность тока и сложный процесс
Типичные области применения	Микроволновые трубки, рентгеновские трубки	Полевой эмиссионный дисплей, микро-рентгеновский источник

Горячие катоды, такие как бариевые вольфрамовые катоды, доминируют в мощной вакуумной электронике с длительным сроком службы, в то время как холодные катоды лучше подходят для маломощных, миниатюрных новых приложений. Они дополняют друг друга в различных сценариях и совместно способствуют прогрессу технологий электронных выбросов.

1.1.3 Сравнение бариевых вольфрамовых катодов с другими тепловыми катодами

Среди семейства термических катодов широко распространены катоды с барием и вольфрамом благодаря своим превосходным комплексным свойствам. Вот его сравнение с распространенными типами тепловых катодов (оксидные катоды, ториевые вольфрамовые катоды, чистые вольфрамовые катоды):

- Оксидный катод

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оксидный катод изготавливается из оксида бария (BaO), оксида стронция (SrO) и других материалов, покрытых никелевой матрицей, с низкой рабочей функцией (около 1–2 эВ), рабочей температурой 800–1000 °С и плотностью эмиссионного тока около 1–5 А/см². Его преимуществом является низкая стоимость и он подходит для маломощных электронных ламп (таких как ранние радиоприемники). Тем не менее, он предъявляет строгие требования к вакуумным средам (менее 10⁻⁷ Па), восприимчив к загрязнению кислородом или водяным паром, что приводит к снижению производительности выбросов, и обычно имеет срок службы от сотен до тысяч часов. Напротив, бариевые вольфрамовые катоды обладают более высокой устойчивостью к ядам и термической стабильностью, что делает их пригодными для сценариев с высокой мощностью и длительным сроком эксплуатации.

- **Торийный вольфрамовый катод**

Торий-вольфрамовый катод достигает низкой рабочей функции (около 2,6 эВ) за счет легирования оксида тория (ThO₂) в вольфрамовой матрице с рабочей температурой 1700–1900 °С и плотностью тока излучения до 5–10 А/см², что делает его пригодным для приложений с высокой плотностью тока, таких как мощные микроволновые трубки. Тем не менее, радиоактивность тория создает потенциальные риски для человека и окружающей среды, ограничивая его применение в медицинской и гражданской областях. Бариевые вольфрамовые катоды не имеют радиоактивной опасности, более низкие рабочие температуры, более высокую энергоэффективность и более длительный срок службы (до десятков тысяч часов).

- **Чистые вольфрамовые катоды**

Катоды из чистого вольфрама изготавливаются из вольфрамовой проволоки или вольфрамового листа, имеют высокую рабочую функцию (около 4,5 эВ) и требуют экстремально высоких температур (2000–2500 °С) для достижения достаточного эмиссионного тока (около 0,1–1 А/см²). Его преимущества заключаются в высокой химической стабильности и пригодности для экстремальных сред (таких как высокий вакуум или высокая температура), но его высокое энергопотребление и низкая эффективность выбросов затрудняют удовлетворение потребностей современных высокопроизводительных устройств. Низкая рабочая функция и низкая рабочая температура бариевых вольфрамовых катодов позволяют им превосходить чистые вольфрамовые катоды по всем параметрам с точки зрения энергоэффективности, производительности и долговечности.

Бариевый вольфрамовый катод стал предпочтительным материалом для теплового катода в современных вакуумных электронных устройствах благодаря своим преимуществам низкой рабочей функции, высокой эффективности излучения, длительному сроку службы и отсутствию радиоактивности, а также широко используется в сценариях с высокой надежностью и высокой мощностью.

1.2 Историческое развитие катода из бария и вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2.1 Происхождение и техническая эволюция бариевых вольфрамовых катодов

Происхождение бариевых вольфрамовых катодов можно проследить до появления технологии термоэмиссионной эмиссии в начале 20-го века. В начале 1900-х годов горячие катоды начали применяться в ранних вакуумных лампах, таких как диоды и триоды в радиосвязи. В то время катоды из чистого вольфрама широко использовались благодаря их высокой температуре плавления и химической стабильности, но их высокая рабочая функция (около 4,5 эВ) и высокая рабочая температура ограничивали эффективность выбросов и энергоэффективность. В 20-х и 30-х годах 20 века появление оксидных катодов значительно снизило рабочую функцию, но их чувствительность к окружающей среде и недостатки короткого срока службы побудили исследователей исследовать более качественные материалы для термокатодов.

В 1950-х годах, с резким ростом спроса на вакуумные электронные устройства, такие как радары, микроволновая связь и телевизионные кинескопы, исследования и разработки маломощных функций и катодов с длительным сроком службы стали горячей темой. В конце 1950-х годов американские ученые впервые предложили концепцию пропитки соединений бария в пористой вольфрамовой матрице и разработали ранний прототип катода из бариевого вольфрама. Этот катод сочетает в себе высокую стабильность вольфрамовой матрицы с низкими функциональными характеристиками соединений бария, что значительно улучшает характеристики выбросов. В 1960-х годах технология получения порошковой металлургии пористой вольфрамовой матрицы и процесс пропитки соединений бария постепенно созрели, и катоды бариевого вольфрама стали коммерчески применяться в микроволновых и рентгеновских трубках.

В 70-х и 80-х годах 20-го века технология бариевых вольфрамовых катодов вступила в период бурного развития. Внедрение новых соединений, таких как алюминат бария и кальция, оптимизирует эмиссионные свойства, а стандартизация процессов активации повышает стабильность производства. С 90-х годов 20-го века, с развитием аэрокосмической, медицинской визуализации и экспериментов в области физики высоких энергий, сфера применения бариевых вольфрамовых катодов еще больше расширилась. В начале 21-го века внедрение нанотехнологий, новых рецептур соединений бария и интеллектуальных производственных процессов вывело производительность и потенциал применения катодов из бариевого вольфрама на новый уровень. Эти технологические достижения привели к развитию вакуумной электроники в направлении высокой мощности, высокой частоты и длительного срока службы.

1.2.2 Ключевые вехи и технологические прорывы

При разработке бариевых вольфрамовых катодов несколько ключевых технологических прорывов сыграли решающую роль в улучшении их характеристик и широком применении:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Прорыв в технологии пористых вольфрамовых матриц (1950–1960-е гг.)**
Достижения в области порошковой металлургии позволили получать вольфрамовые матрицы с высокой пористостью. Пористая структура увеличивает накопительную способность соединений бария за счет капиллярного действия и способствует диффузии реакционноспособного бария на поверхность, тем самым повышая эффективность и стабильность выброса. Этот прорыв положил начало коммерциализации бариевых вольфрамовых катодов.
- **Оптимизация рецептуры соединения бария (1970-е годы)**
алюмината бария-кальция (например, $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) стал ключевым прорывом в области бариевых вольфрамовых катодов. Это соединение медленно разлагается при высоких температурах и способно непрерывно выделять реакционноспособный барий, обеспечивая длительный срок службы катода (десятки тысяч часов) и стабильную эмиссию (плотность тока 10–20 А/см²). Оптимизированная формула также повышает устойчивость к отравлениям и снижает воздействие поверхностного загрязнения.
- **Стандартизация процессов пропитки и активации (1980-е годы) контроль**
параметров пропитки (например, концентрации раствора, времени пропитки, температуры) и процесс активации термообработки значительно улучшили однородность активного слоя и постоянство эмиссионных свойств. Этот стандартизированный процесс способствовал промышленному производству бариевых вольфрамовых катодов, что сделало их более широко используемыми в микроволновых трубках, рентгеновских трубках и других областях.
- **Внедрение нанотехнологий (с 2000-х годов по настоящее время)**
Исследование наноразмерной пористой вольфрамовой матрицы и технологии нанобариевых покрытий еще больше улучшило характеристики выбросов. Структура нанопор увеличивает площадь поверхности и повышает эффективность диффузии атомов бария. Новые методы легирования, такие как добавление редкоземельных элементов, таких как лантан или церий, оптимизируют рабочую функцию и термическую стабильность. Эти технологии позволяют бариевым вольфрамовым катодам продемонстрировать потенциал в новых приложениях, таких как генераторы терагерцовых волн.
- **Интеллектуальное производство и тестирование (с 2010-х годов по настоящее время)**
Современное производство внедрило автоматизированное оборудование для пропитки и технологию мониторинга в режиме реального времени для обеспечения точности производственного процесса. Передовые методы тестирования (например, анализ сканирующей электронной микроскопии, измерение плотности тока излучения) улучшают контроль качества и снижают отклонения производительности в производстве.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти технологические прорывы не только улучшили характеристики бариевых вольфрамовых катодов, но и способствовали широкому применению вакуумных электронных устройств в области радиолокации, связи, медицинских и научных исследований.

1.3 Области применения бариевых вольфрамовых катодов

1.3.1 Вакуумная электроника

Высокая плотность эмиссионного тока, длительный срок службы и превосходная стабильность барий-вольфрамовых катодов делают их основными компонентами различных вакуумных электронных устройств, в том числе:

- **Микроволновые трубки**

Микроволновые трубки — это высокочастотные, мощные электронные устройства, широко используемые в радарх, связи и промышленном отоплении. Бариевые вольфрамовые катоды играют ключевую роль в следующих микроволновых трубках:

- **Магнетрон:** используется в военных и гражданских радарх (например, метеорологических радарх, радарх управления воздушным движением) и микроволновом нагревательном оборудовании (например, промышленных микроволновых печах), его высокая плотность тока (10–20 А/см²) обеспечивает стабильно высокую выходную мощность (вплоть до мегаваттного уровня).
- **Лампа бегущей волны:** используется для спутниковой связи, усилителя наземных базовых станций и высокочастотного вещания, обеспечивая широкополосное усиление сигнала и усиление сигнала с высоким коэффициентом усиления для удовлетворения высокочастотных требований современных систем связи.
- **Трубка клистрона :** используется для мощных радаров (таких как системы наведения ракет) и ускорителей частиц (таких как источники синхротронного излучения), поддерживая высокую импульсную мощность (от сотен киловатт до мегаватт). Высокая стабильность и стойкость к старению бариево-вольфрамовых катодов обеспечивают надежную работу этих устройств в высокочастотных и требовательных условиях.

- **Рентгеновские трубки**

Рентгеновские трубки являются основными компонентами медицинской визуализации и промышленного неразрушающего контроля. Бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают стабильный электронный пучок высокой яркости, который поддерживает следующие приложения:

- **Медицинская визуализация:** Такие как компьютерные томографы и рентгеновские диагностические инструменты, их высокая эффективность излучения позволяет получать изображения с высоким разрешением (разрешение до субмиллиметрового уровня) и быстрое сканирование

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(разрешение второго уровня), повышая точность диагностики и качество обслуживания пациентов.

- **Промышленный неразрушающий контроль:** используется для обнаружения трещин, качества сварных швов и коррозии трубопроводов авиационных компонентов для обеспечения промышленной безопасности и качества продукции. Длительный срок службы (десятки тысяч часов) и однородность бариевых вольфрамовых катодов снижают затраты на обслуживание оборудования и повышают эффективность работы.
- **Другие вакуумные устройства**
Бариевые вольфрамовые катоды также используются в фотоумножителях (для высокочувствительного детектирования света, например, в астрономических наблюдениях и ядерно-физических экспериментах), оборудовании для электронно-лучевой сварки (для прецизионного изготовления аэрокосмических компонентов) и вакуумных переключателях (для электронного управления высоковольтными энергосистемами). Его высокая производительность отвечает строгим требованиям, предъявляемым к этим устройствам к электронным источникам.

1.3.2 Конкретные виды использования в промышленности и научных исследованиях

Бариевые вольфрамовые катоды имеют широкий спектр применения в промышленном производстве и научных исследованиях, в том числе:

- **Электронная микроскопия**
В сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) барий-вольфрамовые катоды обеспечивают стабильный электронный пучок высокой яркости, который поддерживает топографию поверхности с наноразмерным разрешением и анализ внутренней структуры. Высокая плотность эмиссионного тока и низкий уровень шума делают его пригодным для материаловедения (например, анализа полупроводниковых материалов), биологии (например, визуализации клеточной структуры) и нанотехнологических исследований.
- **Масс-спектрометр**
Являясь ключевым компонентом высокочувствительного источника ионов, бариевый вольфрамовый катод играет важную роль в мониторинге окружающей среды (например, обнаружение летучих органических соединений в воздухе), разработке лекарств (например, идентификация метаболитов) и геологических исследованиях (например, анализ изотопного соотношения). Его высокая эмиссионная эффективность повышает чувствительность детектирования масс-спектрометра (до уровня ppb).
- **Оборудование для анализа поверхности**
- В оже-электронном спектрометре (AES), рентгеновском фотоэлектронном спектрометре (XPS) и масс-спектрометре вторичных ионов (SIMS) литрамовый катод

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

с барием обеспечивает стабильный поток электронов для точного анализа химического состава и электронной структуры поверхности материала. Эти технологии широко используются при разработке новых материалов (таких как высокоэффективные сплавы, полупроводниковые пленки) и инженерии поверхности (например, для оптимизации характеристик покрытий).

- **Радары и системы связи**

Бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают мощные источники электронов в военных радарх (таких как системы наведения ракет), гражданских радарх (например, в управлении воздушным движением) и коммуникационном оборудовании (например, спутниковых усилителях, базовых станциях 5G), поддерживая передачу сигналов на большие расстояния и возможности защиты от помех. Его высокая надежность и длительный срок службы снижают затраты на обслуживание системы и отвечают требованиям к высокой производительности современных систем связи.

- **Промышленный нагрев и переработка**

В оборудовании для электронно-лучевого плавления, электронно-лучевой модификации поверхности и вакуумной термообработки бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают высокоэнергетические электронные пучки для очистки металлов (например, при производстве титановых сплавов), подготовке сплавов и цементации корпусов (например, в лопастях авиационных турбин), значительно улучшая свойства материала и повышая эффективность производства.

1.3.3 Междоменный потенциал

С быстрым развитием науки и технологий потенциал применения бариевых вольфрамовых катодов расширяется в новых и междисциплинарных областях, демонстрируя многообещающие перспективы:

- **Новые энергетические технологии**

В ионных двигателях бариевый вольфрамовый катод служит источником сильноточных электронов для поддержки разработки систем микротяги космических аппаратов. Ионные двигатели являются идеальными источниками энергии для освоения дальнего космоса (например, марсохода, межзвездных миссий) благодаря высокому удельному импульсу (до 3000–9000 секунд) и низкому расходу топлива. Высокая стабильность и длительный срок службы бариевых вольфрамовых катодов отвечают высоким требованиям космической среды.

- **Терагерцовая волновая технология**

Терагерцовые волны (0,1–10 ТГц) обладают уникальными преимуществами в визуализации, коммуникации и спектральном анализе. Бариевый вольфрамовый катод обеспечивает мощный источник электронов в вакуумном генераторе электрон-терагерцовых волн, который поддерживает терагерцовую визуализацию (для скрининга безопасности, раннего выявления рака) и высокоскоростную связь (сети

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

следующего поколения 6G). Его высокая эффективность излучения и стабильность обеспечивают возможность коммерциализации терагерцовой технологии.

- **Эксперименты по физике высоких энергий**

В ускорителях частиц (таких как БАК ЦЕРН) и источниках синхротронного излучения барий-вольфрамовые катоды являются источником высокоэнергетических электронов для генерации пучков частиц высокой энергии и изучения свойств и структуры элементарных частиц. Его высокая эффективность и стабильность выбросов позволяют проводить длительные эксперименты с высокой интенсивностью.

- **Биомедицинские приложения**

Благодаря высокоточному масс-спектрометрическому анализу бариевые вольфрамовые катоды могут быть использованы в качестве источника ионов для молекулярного обнаружения в диагностике заболеваний, таких как анализ онкомаркеров и метаболомические исследования. Его высокая чувствительность и надежность способствовали развитию точной медицины. Кроме того, применение катода из бариевого вольфрама в оборудовании для электронно-лучевой стерилизации обеспечивает эффективное решение для стерилизации медицинских изделий.

- **Квантовые технологии**

Изучается потенциальное применение бариевых вольфрамовых катодов в квантовых вычислениях и оборудовании квантовой связи. Его высокая стабильность и низкие характеристики рабочей функции могут быть использованы для разработки высокоточных источников электронов, поддерживающих манипулирование квантовыми битами и обнаружение квантовых состояний. Междисциплинарные исследования (такие как сочетание квантовых материалов и технологий вакуумной электроники) могут привести к новым прорывам в квантовых технологиях.

- **Зеленая энергетика и охрана окружающей среды**

Применение бариевого вольфрамового катода в плазменных генераторах способствует эффективной очистке выхлопных газов и очистке воды, таким как плазменное разложение органических загрязнителей за счет индукции электронным пучком. Кроме того, его потенциальное применение в исследованиях в области термоядерного синтеза, например, в системах электронно-лучевого нагрева для устройств токамака, открывает возможности для развития экологически чистой энергетики.

Таким образом, барий-вольфрамовые катоды, с их превосходными характеристиками и широкой адаптируемостью, не только занимают центральное место в традиционных вакуумных электронных устройствах, но и демонстрируют большой потенциал в новых областях, таких как новая энергетика, терагерцовые технологии, квантовые технологии и биомедицина. Эта глава предоставляет читателям четкую основу знаний через определение бариевых вольфрамовых катодов, сравнения с другими катодами, исторические разработки и всестороннее введение в области применения. В последующих главах мы углубимся в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материаловедение, принципы работы, производственные процессы и стратегии оптимизации производительности, предоставив читателям более всестороннюю и глубокую техническую перспективу.



Глава 2: Материаловедение бариевых вольфрамовых катодов

Превосходство катодов из бариевого вольфрама обусловлено их тщательным составом материала, точными процессами подготовки и взаимодействием сложной микроструктуры и производительности. Являясь эффективным термоэмиссионным материалом, синергетический эффект пористой вольфрамовой матрицы катода из бария вольфрама и соединения бария обеспечивает низкую рабочую функцию, высокую плотность эмиссионного тока и превосходную термическую стабильность, что делает его центральным элементом в вакуумных электронных устройствах. В этой главе подробно рассматривается материаловедение бариевых вольфрамовых катодов, детальный анализ влияния их вещественного состава, процесса подготовки и микроструктуры на эксплуатационные характеристики, освещаются химические и физические свойства пористых вольфрамовых матриц, оптимизация соотношений соединений бария, роль добавок, ключевые технологии в процессе приготовления, а также взаимосвязь между микроструктурой и эмиссионными свойствами.

2.1 Вещественный состав бариевого вольфрамового катода

2.1.1 Химические и физические свойства пористой вольфрамовой матрицы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Пористая вольфрамовая матрица является основной структурой бариевого вольфрамового катода, а ее химические и физические свойства напрямую определяют термическую стабильность, механическую прочность и эффективность электронной эмиссии катода. Пористая вольфрамовая матрица получают по технологии порошковой металлургии с использованием вольфрама высокой чистоты (чистота $\geq 99,95\%$), с соответствующей пористостью и размером пор. Эта пористая структура не только обеспечивает пространство для хранения соединений бария, но и способствует диффузии активных атомов бария за счет капиллярного действия, что приводит к образованию слоя с низкой функцией на поверхности катода. Ниже приведены основные химические и физические свойства пористой вольфрамовой матрицы:

- **Химическая стабильность:** высокая химическая инертность вольфрама делает его очень устойчивым к кислороду, водяному пару и остаточным газам в условиях высокого вакуума (10^{-6} Па или менее). Эта стабильность эффективно снижает риск окисления поверхности или отравления и продлевает срок службы катода. Кроме того, вольфрам обладает низкой химической реакционной способностью к соединениям бария, что позволяет избежать неблагоприятных взаимодействий между матрицей и действующим веществом.
- **Физические свойства:** Высокая температура плавления вольфрама (около $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяет ему выдерживать типичные рабочие температуры ($900\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) барий-вольфрамовых катодов без структурной деградации или деформации. Высокая плотность (около $19,25\text{ г/см}^3$) и высокая механическая прочность (предел прочности около $700\text{--}1000\text{ МПа}$) обеспечивают устойчивость матрицы в условиях высоких температур и высоких нагрузок. Капиллярное действие пористой структуры повышает адсорбционную способность соединений бария, а поровая сеть обеспечивает эффективный канал для диффузии активных атомов бария на поверхность.
- **Тепло- и электропроводность:** Высокая теплопроводность вольфрама (около $173\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) обеспечивает равномерное распределение тепла во время рабочего процесса, снижая деградацию материала, вызванную локальным перегревом. Высокая проводимость (примерно $1,82\times 10^7\text{ См/м}$) обеспечивает эффективную передачу электронных данных, что делает его пригодным для нужд мощных электронных устройств.
- **Свойства пор:** Пористость и распределение пор по размерам являются ключевыми параметрами для пористой вольфрамовой матрицы. Пористость $20\text{--}30\%$ уравнивает накопительную способность и механическую прочность соединений бария, а диапазон размеров пор $1\text{--}10\text{ мкм}$ обеспечивает эффективность капиллярного действия. Поры должны образовывать связанную сеть, чтобы поддерживать непрерывную диффузию атомов бария.

Пористость и распределение пор по размерам пористой вольфрамовой матрицы необходимо контролировать с помощью точного процесса подготовки, слишком высокая пористость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

может привести к недостаточной механической прочности, а слишком низкая пористость ограничит эффективность хранения и диффузии соединений бария и повлияет на характеристики выбросов. Микроструктура матрицы обычно анализируется с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) или рентгеновской томографии (Х-КТ) для обеспечения однородности и консистенции пор.

2.1.2 Свойства и соотношения соединений бария (таких как алюминат бария и кальция)

Соединения бария являются ключевыми компонентами бария вольфрамового катода для достижения низкой рабочей функции и высокой эффективности выбросов, а обычно используемыми соединениями бария являются алюминат бария кальция (например, $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, сокращенно 4:1:1). Эти соединения высвобождают свободные атомы бария путем термического разложения при высоких температурах ($900\text{--}1100^\circ\text{C}$) и диффундируют на поверхность пористой вольфрамовой матрицы, образуя слой с низкой рабочей функцией (рабочая функция около 1,1–1,5 эВ), что значительно снижает энергию, необходимую для убегания электронов. Ниже приведены основные свойства и оптимизация соотношения соединений бария:

- **Химические свойства:** Алюминат бария-кальция разлагается при высоких температурах в результате следующих реакций:
$$4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Ba} + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{O}_2$$
Высвободившиеся свободные атомы бария адсорбируются на поверхности вольфрамовой матрицы, образуя единый атомный слой или тонкую пленку, снижая рабочую функцию. Образующиеся побочные продукты (например, CaO , Al_2O_3) обладают высокой химической стабильностью и не влияют на показатели выбросов. Скорость разложения соединения должна быть умеренной, чтобы обеспечить непрерывную подачу бария при длительной эксплуатации и избежать потери активного слоя из-за чрезмерного испарения.
- **Физические свойства:** Температура плавления алюмината бария-кальция выше рабочей температуры катода, что предотвращает преждевременное плавление или испарение. Размер частиц соединения должен соответствовать размеру пор вольфрамовой матрицы, чтобы обеспечить равномерную пропитку и эффективную диффузию. Коэффициент теплового расширения соединения отличается от коэффициента теплового расширения вольфрамовой матрицы, и термическое напряжение необходимо снизить за счет оптимизации процесса.
- **Оптимизация соотношения:** соотношение 4:1:1 ($4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) является стандартным для промышленного применения, поскольку он сочетает в себе скорость выделения бария, химическую стабильность и токсичность. Другие конфигурации включают 5:3:2 ($5\text{BaO} \cdot 3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) или 6:1:2 ($6\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) также исследуется в конкретных сценариях. Например, соотношение 5:3:2 может улучшить противотравляющую способность и подходит для сред с высоким содержанием остаточных газов; Соотношение 6:1:2 увеличивает скорость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высвобождения бария, что подходит для потребностей с высокой плотностью тока, но может сократить срок службы. Выбор соотношения должен быть оптимизирован в соответствии со сценарием применения, таким как мощные микроволновые трубки или рентгеновские трубки с длительным сроком службы.

- **Адаптивность к окружающей среде:** Соединения бария чувствительны к кислороду и водяному пару, и их необходимо хранить и обрабатывать в среде с высоким вакуумом, чтобы избежать деградации из-за окисления или гидратации.

Соотношение и характеристики частиц соединений бария напрямую влияют на эффективность формирования активного слоя и долгосрочную стабильность катода, и их необходимо оптимизировать экспериментально для удовлетворения потребностей различных областей применения.

2.1.3 Влияние присадок на показатели выбросов

С целью дальнейшего повышения эффективности выбросов, термической стабильности и антиотравляющей способности бариевых вольфрамовых катодов часто добавляют добавки в соединения бария или вольфрамовые матрицы. Ниже приведены распространенные добавки и их эффекты:

- **Оксиды редкоземельных элементов (например, La_2O_3 , CeO_2):** Редкоземельные элементы повышают эффективность излучения за счет снижения рабочей функции (до 1,0 эВ или менее) при одновременном улучшении термической стабильности активного слоя. Например, легирование 0,5–2 мас.% La_2O_3 значительно снижает рабочую функцию и повышает стойкость к окислению, что делает его пригодным для применения в условиях высокой мощности. CeO_2 повышает твердость поверхности и снижает механический износ.
- **Соединения кальция (Ca) или стронция (Sr):** контролируют скорость разложения соединений бария, регулируя соотношение CaO или SrO , и продлевают срок службы катода. Например, увеличение соотношения CaO (до соотношения 2:1:1) может замедлить скорость высвобождения бария, что подходит для приложений с длительным сроком службы, таких как устройства спутниковой связи, но может немного снизить плотность передаваемого тока.
- **Металлические добавки (например, Os, Ir):** нанесение тонкого слоя осмия (Os) или иридия (Ir) (толщиной около 0,1–1 мкм) на поверхность вольфрамовой матрицы может усилить катализ поверхности, способствуя диффузии атомов бария и образованию активных слоев. Покрытия OS могут снизить рабочую функцию примерно до 1,0 эВ, но стоимость выше, и существует компромисс между экономическими факторами.
- **Силикатные или боратные добавки:** повышают устойчивость к отравлению за счет образования защитного слоя и уменьшают воздействие кислородного или углеродного загрязнения. Тем не менее, избыток силиката может увеличить рабочую

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

функцию, поэтому коэффициент добавления (обычно < 1 мас.%) необходимо контролировать.

- **Другие добавки:** такие как оксид иттрия (Y_2O_3) или диоксид циркония (ZrO_2), которые улучшают термическую стабильность и механическую прочность, подходят для применения в экстремальных условиях (например, в космической электронике).

Тип и соотношение добавок должны быть точно оптимизированы с помощью экспериментов, а чрезмерное добавление может привести к неравномерным активным слоям или побочным реакциям, снижая показатели выбросов. Выбор добавок должен быть разработан с учетом конкретных сценариев применения, таких как высокая плотность тока, длительный срок службы или потребности в защите от отравлений.

2.2 Процесс получения катода из бария и вольфрама

2.2.1 Получение пористой вольфрамовой матрицы: порошковая металлургия и контроль пор

Подготовка пористой вольфрамовой матрицы является основным этапом производства бариевого вольфрамового катода с использованием технологии порошковой металлургии, и этот процесс включает в себя порошковое просеивание, прессование, спекание и контроль пор. Вот подробные шаги:

- **Просеивание вольфрамового порошка:** Выберите вольфрамовый порошок высокой чистоты (чистота $\geq 99,95\%$, размер частиц 1–10 мкм) для обеспечения химической стабильности и однородности матрицы. Распределение частиц по размерам оказывает непосредственное влияние на структуру пор и должно быть оптимизировано с помощью технологии вибрационного скрининга или классификации воздушного потока. Частицы меньшего размера (1–3 мкм) увеличивают пористость, но могут снизить механическую прочность; Более крупные частицы (5–10 мкм) повышают прочность, но уменьшают пористость.
- **Прессование:** вольфрамовый порошок помещают в форму и прессуют под высоким давлением (100–500 МПа) для формирования заготовок, обычно цилиндрических (диаметром 5–20 мм) или листовых (толщиной 1–5 мм). В процессе прессования необходимо контролировать давление, конструкцию пресс-формы и использование смазочного материала для достижения однородной начальной структуры пор. Методы двунаправленного прессования или изостатического прессования улучшают однородность плотности заготовок.
- **Процесс спекания:** Высокотемпературное спекание (2000–2500°C) в вакууме (10^{-4} – 10^{-6} Па) или водородной атмосфере позволяет частицам вольфрама объединяться посредством диффузии с образованием пористой структуры. Время спекания (1–4 часа) и температуру необходимо точно контролировать, слишком высокая температура может привести к схлопыванию пор, а слишком низкая температура

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повлияет на прочность сцепления частиц. Атмосфера водорода уменьшает количество оксидных примесей и улучшает чистоту матрицы.

- **Контроль пористости:** Контролируйте пористость и размер пор путем добавления временных наполнителей (например, крахмала, полиметилметакрилата) или регулировки распределения частиц вольфрамового порошка по размерам. Наполнитель улетучивается в процессе спекания, создавая равномерную поровую сеть. Испытания на пористость показывают, что 20–30% пористости уравнивают механическую прочность с емкостью накопления соединений бария.

Качество пористой вольфрамовой матрицы напрямую влияет на последующий процесс пропитки и работу катода, а консистенция пористой структуры должна быть проверена с помощью SEM, X-CT или анализа удельной поверхности (BET). Оптимизированная матрица должна иметь равномерное распределение пор, высокую механическую прочность (прочность на сжатие >500 МПа) и соответствующий размер пор (1–10 мкм).

2.2.3 Процесс пропитки соединений бария: приготовление раствора и параметры пропитки

Процесс пропитки соединений бария является ключевым этапом равномерного введения соединений бария в пористые вольфрамовые подложки, что напрямую влияет на эффективность формирования и эмиссионные свойства активного слоя. Процесс включает в себя приготовление раствора, пропитку, сушку и термическую обработку следующим образом:

- **Приготовление раствора:** алюминат бария кальция (например, $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) смешивается с деионизированной водой или органическим растворителем, таким как этанол, с образованием суспензии или раствора. Вязкость и диспергирование частиц раствора должны быть оптимизированы с помощью перемешивания или ультразвука, чтобы обеспечить равномерное проникновение в поры. Добавление небольшого количества поверхностно-активного вещества, такого как поливиниловый спирт, улучшает смачиваемость раствора.
- **Процесс пропитки:** Пористая вольфрамовая матрица погружается в раствор соединения бария с использованием методов вакуумной пропитки (10^{-2} – 10^{-4} Па) или пропитки под давлением (0,1–1 МПа) для облегчения проникновения раствора в поры. Вакуумная пропитка удаляет воздух из пор и повышает эффективность наполнения; Пропитка под давлением увеличивает глубину проникновения раствора. Такие условия, как температура и время пропитки, должны быть оптимизированы в соответствии с пористостью матрицы и концентрацией раствора, а слишком длительное время замачивания может привести к закупорке пор.
- **Сушка и термическая обработка:** Пропитанный субстрат высушивается при низких температурах (100–300°C) для удаления растворителей и предотвращения повреждения пористой структуры. Затем следует высокотемпературная термическая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработка (1000–1200 °C) в вакууме или инертной атмосфере для отверждения соединения бария и формирования начального активного слоя. Термическую обработку следует нагревать поэтапно, чтобы избежать термического напряжения, вызывающего растрескивание матрицы.

Параметры процесса пропитки оказывают существенное влияние на однородность и эмиссионные свойства активного слоя. Например, слишком высокая концентрация раствора может привести к накоплению соединений бария на поверхности, что снижает однородность излучения; Слишком высокие температуры термической обработки могут ускорить испарение бария и сократить срок его службы. Оптимизация процесса требует экспериментальной валидации (например, наблюдения СЭМ или эмиссионных испытаний) для обеспечения равномерного распределения соединений бария и стабильных активных слоев.

2.3 Микроструктура и свойства бариевых вольфрамовых катодов

2.3.1 Анализ пористости и структуры пористой вольфрамовой матрицы

Микроструктура пористой вольфрамовой матрицы является основой катодной производительности бариевого вольфрама, а ее пористость, распределение пор по размерам и связность напрямую влияют на свойства хранения, диффузии и эмиссии соединений бария. Ниже приведены основные структурные характеристики и методы анализа:

- **Пористость:** Типичная пористость контролируется на уровне 20–30%, чтобы сбалансировать накопительную способность соединения бария с его механической прочностью. Высокая пористость может привести к недостаточной прочности матрицы и легкой деформации при высоких температурах. Если она будет слишком низкой, скорость высвобождения бария будет ограничена, а плотность передающего тока будет снижена. Ртутная интрузия или газовая адсорбция (БЭТ) обычно используется для точного измерения пористости.
- **Структура пор:** Поры должны образовывать трехмерную сеть, чтобы обеспечить эффективную диффузию атомов бария на поверхность за счет капиллярного действия. Распределение пор по размерам должно быть равномерным, слишком большой размер пор может привести к неравномерному распределению соединений бария, а слишком малый размер пор ограничит эффективность диффузии. Рентгеновская томография (КТ) реконструирует трехмерную структуру пор и проверяет связность.
- **Структурный анализ:** Сканирующая электронная микроскопия (SEM) используется для наблюдения за морфологией пор и свойствами поверхности, а анализ удельной площади поверхности (BET) используется для измерения площади поровой поверхности. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) анализирует распределение примесей в вольфрамовых матрицах для обеспечения высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чистоты. Однородность и связность поровой структуры имеют решающее значение для долгосрочной стабильности катода.

Оптимизация структуры пор должна быть достигнута путем регулировки размера частиц, давления прессования и параметров спекания вольфрамового порошка. Результаты структурного анализа необходимо объединить с тестом на эффективность выбросов, чтобы проверить влияние пористого дизайна.

2.3.2 Взаимосвязь между морфологией поверхности и эмиссионными характеристиками активного слоя бария

Активный слой бария является ядром эмиссионных характеристик бариевого вольфрамового катода, а морфология его поверхности напрямую определяет рабочую функцию, плотность тока излучения и однородность излучения. Ниже приведены ключевые особенности и их отношение к производительности:

- **Морфология поверхности:** Активный слой состоит из одного атомного слоя или тонкой пленки, образованной атомами бария и их оксидами на поверхности вольфрамовой матрицы. Идеальный активный слой должен быть однородным, непрерывным с низкой шероховатостью поверхности для обеспечения равномерности электронной эмиссии и низких шумовых характеристик. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ) обычно используются для анализа рельефа поверхности и проверки плоскостности и покрытия активных слоев.
- **Рабочая функция:** Образование активного слоя снижает рабочую функцию с 4,5 эВ до 1,1–1,5 эВ для чистого вольфрама, значительно увеличивая плотность передаваемого тока. Равномерность рабочей функции зависит от скорости диффузии и покрытия поверхности атомов бария, а недостаточное покрытие (<80%) может привести к образованию локальных областей с высокой рабочей функцией, снижая эффективность эмиссии.
- **Характеристики излучения:** Однородный активный слой обеспечивает высокую плотность передающего тока и низкий уровень шума, удовлетворяя потребности мощных микроволновых или рентгеновских трубок. Поверхностные дефекты (например, трещины, скопления частиц) могут вызвать локализованное дуговое образование или неравномерное излучение, снижая производительность. Характеристики выбросов обычно оцениваются с помощью термоэмиссионных испытаний.
- **Влияющие факторы:** На производительность активного слоя влияют следующие факторы:
 - **Рабочая температура:** Чрезмерная температура ускоряет испарение бария, что приводит к потере активного слоя и сокращению срока службы. Слишком

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

низкая температура ограничивает диффузию бария и снижает эффективность выброса.

- **Вакуумная среда:** Низкий вакуум ($>10^{-6}$ Па) может вызвать окисление или загрязнение поверхности, увеличивая рабочую функцию.
- **Загрязнение поверхности:** Кислород, водяной пар или углеродные соединения могут вступать в реакцию с барием с образованием соединений с высокой рабочей функцией (таких как BaO_2), снижая показатели выбросов.
- **Процесс термообработки:** Пошаговая активация создает однородный активный слой, оптимизируя показатели выбросов.

Оптимизируя процесс пропитки, параметры термообработки и рецептуру присадок, можно сформировать однородный и стабильный активный слой, улучшая характеристики эмиссии и срок службы бариевых вольфрамовых катодов. Корреляция между топографией поверхности и показателями выбросов должна быть всесторонне проанализирована с помощью SEM, AFM и испытаний на выбросы для улучшения процесса.

Подводя итог, можно сказать, что материаловедение барий-вольфрамовых катодов включает в себя сложное взаимодействие пористых вольфрамовых матриц, соединений бария и добавок, а процесс его получения и микроструктура оказывают решающее влияние на характеристики эмиссии и срок службы. Благодаря всестороннему анализу состава материала, процесса подготовки и микроструктуры, эта глава закладывает прочную основу для последующего обсуждения принципов работы, технологии производства и оптимизации производительности.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Глава 3: Принцип работы и механизм запуска

Являясь высокоэффективным термоэмиссионным материалом, бариевый вольфрамовый катод обусловлен уникальным принципом работы и механизмом эмиссии. В этой главе подробно рассматривается теория термоэмиссионной эмиссии, эмиссионные характеристики и различные факторы, влияющие на характеристики бариевых вольфрамовых катодов. Основываясь на основном принципе термоэмиссионной эмиссии в сочетании с уравнением Ричардсона-Душмана, эффектом Шоттки и перспективой квантовой механики, в данной работе анализируется механизм формирования низкой рабочей функции катода из бариевого вольфрама, динамическое поведение активного слоя и его термическая стабильность, а также подробно рассматриваются эффекты рабочей среды, старения и отравления. и режим отказа по показателям выбросов.

3.1 Теория термоэмиссионной эмиссии

Термоэмиссионная эмиссия является основным принципом работы бариевого вольфрамового катода, который относится к процессу нагрева материала для получения достаточной энергии для того, чтобы электроны преодолели поверхностный барьер и улетучились в вакуум. В этом разделе анализируется механизм эмиссии бариевого вольфрамового катода с точки зрения классической термоэмиссионной теории в сочетании с уравнением Ричардсона-Душмана, эффектом Шоттки и квантовой механикой.

3.1.1 Уравнение Ричардсона-Душмана

Уравнение Ричардсона-Душмана является базовой теоретической моделью, описывающей термоэмиссионную эмиссию, которая выражает связь между плотностью тока излучения и температурой и функцией работы. Для катода бариевого вольфрама плотность его тока излучения (Дж) может быть описана следующим уравнением:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

Для этого:

- (J): Плотность излучаемого тока (единица: А/см²);
- (A): Постоянная Ричардсона (теоретическое значение 120,4 А/см²· К², фактическое значение варьируется в зависимости от свойств поверхности материала, обычно 50–100 А/см²· К²);
- (T): Абсолютная температура (единица: К, типичная рабочая температура бариевого вольфрамового катода составляет 1173–1373 К, т.е. 900–1100°C);
- (exp): экспоненциальная функция.
- (φ): рабочая функция (единица: эВ, вольфрамовый катод с барием около 1,1–1,5 эВ);
- (k): постоянная Больцмана (8,617×10⁻⁵ эВ/К).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В барий-вольфрамовых катодах низкая рабочая функция (1,1–1,5 эВ) значительно увеличивает экспоненциальный член, в результате чего плотность тока излучения при более низких температурах составляет 10–20 А/см², что значительно выше, чем у чистых вольфрамовых катодов (около 4,5 эВ и плотность тока около 0,1–1 А/см²). Фактическое значение постоянной Ричардсона зависит от состояния поверхности, покрытия активным слоем бария и микроструктуры, и его необходимо измерять экспериментально, например, с помощью термоэмиссионного испытательного оборудования в условиях высокого вакуума. Применение уравнений учитывает фактические условия эксплуатации, такие как однородность температуры и вакуумная среда, для обеспечения точности прогнозирования.

3.1.2 Эффект Шоттки и излучение, усиленное полем

Эффект Шоттки относится к явлению, при котором поверхностный барьер материала уменьшается под действием внешнего электрического поля, что приводит к усилению термоэмиссионной эмиссии. В бариевых вольфрамовых катодах эффект Шоттки описывается следующей модифицированной функцией работы:

$$\phi_{\text{eff}} = \phi - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}$$

Для этого:

- (ϕ_{eff}): эффективная функция работы (единица: эВ), которая представляет собой функцию работы после уменьшения под действием приложенного электрического поля;
- (ϕ): Первоначальная рабочая функция (единица измерения: эВ);
- (e): электронное питание ($1,602 \times 10^{-19}$ С);
- (E): Приложенная напряженность электрического поля (единица: В/м);
- (ϵ_0): Вакуумная диэлектрическая проницаемость ($8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м).

В условиях сильного электрического поля (например, 10^7 – 10^8 В/м, обычно встречающихся в микроволновых или рентгеновских трубках) уменьшение рабочей функции может значительно увеличить плотность передаваемого тока. Эффект Шоттки особенно важен для мощных устройств, так как он позволяет получать высокий выходной ток при более низких температурах, снижая энергопотребление и тепловое напряжение. В практических приложениях однородность электрического поля должна быть оптимизирована за счет конструкции электродов (например, с использованием гладких круглых электродов), чтобы избежать образования дуги, вызванной локальными чрезмерными электрическими полями и повреждением поверхности катода.

3.1.3 Перспективы квантовой механики

При высокой напряженности поля или в экстремальных условиях квантово-механические эффекты (например, эффект туннелирования) оказывают определенное влияние на поведение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

излучения катодов из бариевого вольфрама. Эффект туннелирования относится к утечке электронов в вакуум посредством квантового туннелирования без полного преодоления поверхностного барьера. Вероятность туннельного эффекта описывается уравнением Фаулера-Нордхейма:

$$J = \frac{A'E^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{3/2}}{E}\right)$$

Для этого:

- (J): плотность туннельного тока (единица: А/см²), которая представляет собой интенсивность потока электронов на единицу площади;
- (A'), (B): постоянные (относящиеся к материалу и геометрии, типичные значения составляют 1,54×10⁻⁶ А·эВ/В² и 6,83×10⁹ В/м·эВ^{-3/2});
- (E): Напряженность электрического поля (единица: В/м);
- (φ): Рабочая функция (единица измерения: эВ).

В барий-вольфрамовых катодах туннельные эффекты обычно значительны при очень высоких электрических полях, например, в микроволновых устройствах с усилением поля или генераторах терагерцовых волн. Низкая рабочая функция снижает барьер при прохождении туннеля и повышает вероятность проходки туннеля. Однако, поскольку литрамовый катод с барием в основном зависит от термоэмиссионного излучения, туннельный эффект имеет небольшой вклад и должен учитываться только в конкретных сценариях с высокой напряженностью поля. Перспектива квантовой механики дополняет понимание сложных механизмов эмиссии и помогает оптимизировать конструкцию катода, например, улучшить эффект локального усиления электрического поля за счет корректировки рельефа поверхности (например, наноразмерных выступов).

3.2 Эмиссионные характеристики бариевых вольфрамовых катодов

3.2.1 Механизм формирования функции малой мощности

Низкая рабочая функция (1,1–1,5 эВ) барий-вольфрамового катода является основой его высокой эмиссионной эффективности, которая обусловлена диффузией и поверхностным действием атомов бария в пористой вольфрамовой матрице. Ниже приведен подробный разбор механизма формирования:

- **Диффузия атомов бария:** при рабочей температуре алюминат бария кальция (например, 4BaO·CaO·Al₂O₃) высвобождает свободные атомы бария в результате реакции термического разложения:



эти атомы диффундируют на поверхность через поровую сеть пористой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовой матрицы с коэффициентом диффузии около 10^{-10} м²/с, что достаточно для формирования равномерного поверхностного покрова за секунды. Связность пор и пористость (20–30%) имеют решающее значение для эффективности диффузии и должны быть оптимизированы с помощью процессов порошковой металлургии.

- **Поверхностное действие:** атомы бария адсорбируются на поверхности вольфрамовой матрицы, образуя один атомный слой или тонкую пленку. Низкая электроотрицательность бария и высокая электроотрицательность вольфрама образуют поверхностный дипольный слой, который уменьшает поверхностный барьер и снижает рабочую функцию вольфрама с 4,5 эВ до 1,1–1,5 эВ. Покрытие поверхности должно составлять более 80% для обеспечения равномерности рабочей функции, ниже которой может образоваться локальная зона с высокой рабочей функцией и снизить эффективность выбросов.
- **Химическая и физическая адсорбция:** атомы бария образуют прочные связи с поверхностью вольфрама посредством химической адсорбции для повышения стабильности активного слоя. Физически адсорбированные атомы бария обеспечивают непрерывное восполнение бария для поддержания динамического равновесия. Стабильность хемосорбции обеспечивает долгосрочную надежность активного слоя при высоких температурах.

Формирование низкой рабочей функции зависит от скорости разложения соединений бария, эффективности диффузии пористой структуры и однородности морфологии поверхности. Оптимизация этих факторов приводит к стабильной высокой плотности тока и низкому уровню шума, что делает их пригодными для мощной вакуумной электроники, такой как микроволновые и рентгеновские трубки.

3.2.2 Динамическое поведение и термическая стабильность активных слоев

Динамические свойства и термическая стабильность активного слоя бария напрямую влияют на производительность и срок службы катода. Вот ключевые особенности:

- **Динамическое поведение:** Активный слой находится в динамическом равновесии во время работы, при этом атомы бария непрерывно диффундируют из пор на поверхность, в то время как некоторые атомы бария теряются из-за испарения. Необходимо оптимизировать соотношение соединений бария для того, чтобы скорость восполнения соответствовала норме потерь. Покрытие активного слоя колеблется со временем, и первоначальное образование необходимо оптимизировать с помощью поэтапного процесса активации, чтобы уменьшить ранние потери.
- **Термическая стабильность:** активный слой должен быть стабильным при температуре 900–1100 °С, а потери бария на испарение ускоряются при слишком высокой температуре, что приводит к увеличению рабочей функции. Слишком низкая температура ограничивает диффузию бария и снижает эффективность выбросов. Высокая теплопроводность (173 Вт/м·К) и низкий коэффициент теплового

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

расширения ($4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) вольфрамовой матрицы обеспечивают минимизацию термического напряжения и сохранение структурной целостности активного слоя.

- **Топография поверхности:** Шероховатость поверхности активного слоя должна поддерживаться на низком уровне, чтобы избежать локальных областей с высокой мощностью. Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) показал, что однородный активный слой снижает шум излучения (уровень шума $<1\%$) и улучшает стабильность тока. Например, поверхностные дефекты, такие как скопление частиц, могут вызывать локальные колебания плотности тока, увеличивая шум.

Динамические характеристики и термическая стабильность активного слоя должны быть оптимизированы за счет точного управления процессом (например, параметры пропитки, температура активации). Например, добавление небольшого количества оксидов редкоземельных элементов может улучшить сопротивление испарению активного слоя и продлить его срок службы. Регулярный мониторинг рельефа поверхности и эмиссионных свойств (например, с помощью СЭМ или амперметра) позволяет оценить стабильность активного слоя.

3.3 Факторы, влияющие на характеристики выбросов бариевого вольфрамового катода

На производительность бариевых вольфрамовых катодов влияет множество факторов, включая условия эксплуатации, эффекты старения и отравления, а также режимы отказа.

3.3.1 Рабочая среда

Рабочая среда оказывает значительное влияние на характеристики выбросов бариевых вольфрамовых катодов, включая температуру, вакуум, загрязнение поверхности, внешнее электрическое поле и механические нагрузки.

- **Рабочая температура:** Идеальная рабочая температура для бариев-вольфрамовых катодов составляет $900\text{--}1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1173\text{--}1373 \text{ K}$), что обеспечивает высокую плотность передающего тока для мощных устройств. Чрезмерная температура ускоряет потери бария на испарение, влияет на покрытие активного слоя, повышает рабочую функцию, снижает плотность тока. Слишком низкая температура ограничивает диффузию атомов бария и снижает эффективность излучения.

Механизм воздействия: высокая температура ускоряет термическое испарение атомов бария и уменьшает покрытие активного слоя; Низкая температура замедляет скорость разложения и диффузии, что сказывается на стабильности работы функции.

Стратегии преодоления трудностей:

- Равномерность температуры контролируется высокоточной системой отопления, а мониторинг в режиме реального времени осуществляется с помощью инфракрасного термометра.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Оптимизируйте соотношение соединений бария, чтобы замедлить потери бария на испарение при высокой температуре и продлить срок службы активного слоя.
- Спроектируйте эффективную структуру рассеивания тепла (например, добавьте охлаждающие каналы к задней части вольфрамовой матрицы), чтобы избежать локального перегрева.
- **Вакуумная среда:** Бариевые вольфрамовые катоды должны работать в условиях высокого вакуума, чтобы избежать остаточного загрязнения газами. Низкий вакуум приводит к тому, что соединения кислорода, водяного пара или углерода вступают в реакцию с барием с образованием соединений с высокой рабочей функцией, которые снижают плотность тока излучения.

Механизм воздействия: Остаточный газ вступает в химическую реакцию с атомами бария с образованием инертных соединений, увеличивая поверхностный барьер и снижая эффективность ускорения электронов.

Стратегии преодоления трудностей:

- Поддерживайте вакуум с помощью высокоэффективной вакуумной насосной системы, такой как турбомолекулярный или ионный насос.
- Технология вакуумной сварки (например, металлокерамическая сварка) и предварительная вакуумная обработка уменьшают выбросы остаточных газов.
- Регулярно очищайте вакуумную камеру (например, при плазменной очистке или высокотемпературном обжиге) для удаления молекул адсорбированного газа.
- **Загрязнение поверхности:** кислород, водяной пар, углеродные соединения или сульфиды вступают в реакцию с барием с образованием высокомолекулярных функциональных соединений (таких как BaCO_3), что значительно снижает эффективность выбросов. Уровень загрязнения обычно пропорционален парциальному давлению газа. К распространенным загрязнителям относятся:
 - Кислород: образует BaO_2 (рабочая функция 2,5 эВ).
 - Водяной пар: образует Ba(OH)_2 (рабочая функция 2,8 эВ).
 - Углеродные соединения: образование BaCO_3 (рабочая функция 3,0 эВ).

Механизм воздействия: Загрязнитель занимает активный центр посредством хемосорбции, разрушает функциональный слой с низкой мощностью и приводит к снижению производительности выбросов.

Стратегии преодоления трудностей:

- Условия чистых помещений используются во время производства и установки катодов для снижения первоначального загрязнения.
- Предварительная обработка удаляет поверхностные загрязнения.
- Антиоксиданты добавляются для формирования защитного слоя, чтобы замедлить скорость реакции загрязнения.
- Периодическая регенерация поверхности (например, ионная бомбардировка или криогенная активация) восстанавливает характеристики выбросов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Внешнее электрическое поле:** приложенное электрическое поле улучшает характеристики излучения за счет эффекта Шоттки, уменьшая рабочую функцию и увеличивая плотность тока. Однако чрезмерное количество электрических полей может вызвать локализацию дугового разряда, что приведет к повреждению поверхности или нестабильности излучения. Недостаточная однородность электрического поля может привести к чрезмерному локальному току, ускоряя старение.

Механизм воздействия: высокое электрическое поле снижает потенциальные барьеры и усиливает излучение; Неравномерное электрическое поле вызывает локальный перегрев или возникновение дугового разряда, повреждая структуру поверхности.

Стратегии преодоления трудностей:

- Оптимизируйте геометрию электродов (например, гладкий круглый электрод или конструкцию затвора) для обеспечения однородности электрического поля.
- Используйте пробники электрического поля для контроля напряженности электрического поля в режиме реального времени, чтобы избежать чрезмерного электрического поля.
- Полировка поверхности и ремонт дефектов (например, лазерный ремонт) снижают риск образования дугового разряда.

- **Механическое напряжение:** Работа при высокой температуре может вызвать термическое напряжение, особенно в случаях больших температурных градиентов, что приводит к образованию микротрещин или коллапсу пор вольфрамовой матрицы.

Механизм воздействия: Термическое напряжение вызывает повреждение структуры матрицы, влияя на диффузию бария и стабильность активного слоя.

Стратегии преодоления трудностей:

- Для снижения термического напряжения используется ступенчатый нагрев.
- Оптимизируйте пористость, сбалансируйте механическую прочность и эффективность диффузии.
- Используйте высокопрочную вольфрамовую матрицу для повышения трещиностойкости.

Оптимизация рабочей среды требует комплексного учета контроля температуры, вакуумной технологии, конструкции электродов и механической стабильности для обеспечения стабильно высоких показателей выбросов.

3.3.2 Механизм старения и токсические эффекты

Эффекты старения и отравления являются основными причинами ухудшения характеристик бариевого вольфрамового катода, а механизм заключается в следующем:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Эффект старения:** длительная эксплуатация приводит к истощению соединений бария, уменьшению покрытия активного слоя и повышению работоспособности. Срок службы бариевого вольфрамового катода тесно связан с количеством хранящегося бария и условиями работы.

Механизм воздействия: Истощение бария уменьшает покрытие активного слоя, увеличивает поверхностный барьер и снижает эффективность убления электронов.

Стратегии преодоления трудностей:

- Увеличьте пористость или оптимизируйте соотношение соединений бария для увеличения запасов бария и продления срока службы.
 - Регулярная низкотемпературная активация пополняет активный слой для восстановления покрытия.
 - Мониторинг передаваемого тока в режиме реального времени, прогнозирование процессов старения и заблаговременная корректировка рабочих параметров.
 - Высокопроизводительные соединения бария используются для увеличения начального накопления бария в системах с высокой мощностью.
- **Отравляющий эффект:** Остаточные газы (такие как O_2 , H_2O , CO_2) вступают в реакцию с барием с образованием высокомолекулярных функциональных соединений (таких как BaO_2 , $BaCO_3$), снижая эффективность выбросов. Скорость отравления прямо пропорциональна парциальному давлению газа, а к распространенным загрязнителям и их последствиям относятся:

- Кислород: образует BaO_2 (рабочая функция 2,5 эВ).
- Водяной пар: образует $Ba(OH)_2$ (рабочая функция 2,8 эВ).
- Углеродные соединения: образование $BaCO_3$ (рабочая функция 3,0 эВ).

Механизм воздействия: Загрязнитель занимает активный центр посредством хемосорбции, разрушает функциональный слой с низкой мощностью и приводит к снижению производительности выбросов.

Стратегии преодоления трудностей:

- Антиоксидантные вещества добавляются для формирования защитного слоя, замедляя скорость реакции и продлевая время поддержания работоспособности.
- Повышение уровня вакуума снижает вероятность загрязнения, например, при использовании комбинации ионных насосов и криогенных ловушек.
- Регулярная регенерация поверхности (например, ионная бомбардировка или криогенная активация) удаляет загрязнения и восстанавливает текущую плотность.
- Оптимизируйте конструкцию электродов (например, добавьте экранирование), чтобы уменьшить контакт загрязнений с активным слоем.

Управление последствиями старения и токсичности должно быть достигнуто за счет оптимизации материалов, совершенствования процессов и контроля окружающей среды.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.3 Анализ режима отказа

Режимы отказа бариевых вольфрамовых катодов включают следующие типы, каждый из которых требует определенных методов диагностики и стратегий улучшения:

- **Затухание выбросов, вызванное загрязнением поверхности:** загрязняющие вещества (такие как BaO_2 , BaCO_3) увеличивают рабочую функцию и снижают плотность тока и его производительность.

Методы диагностики:

- Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) анализирует химический состав поверхности, обнаруживает соотношение Ва/О/С и подтверждает тип загрязнения.
- Термоэмиссионные испытания оценивают затухание плотности тока.
- Энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) проверяет распределение поверхностных элементов.

Стратегия улучшения:

- Противоотравляющие добавки используются для формирования антиоксидантного защитного слоя.
- Используйте среду с высоким вакуумом и плазменную очистку для удаления загрязнений.
- Оптимизируйте процесс активации, например пошаговый нагрев, чтобы обеспечить первоначальную очистку поверхности.

- **Истощение бария:** Длительная эксплуатация приводит к истощению соединений бария, уменьшается покрытие активного слоя, увеличивается рабочая функция, уменьшается плотность тока.

Методы диагностики:

- СЭМ наблюдал за морфологией активного слоя и верифицировал покрытие.
- Измерения рабочих функций (например, испытания на термоэмиссионную эмиссию) позволяют оценить ухудшение производительности.
- EDS анализ содержания бария.

Стратегия улучшения:

- Увеличьте хранение бария.
- Оптимизированное соотношение замедляет истощение бария и продлевает срок службы.
- Регулярная низкотемпературная активация восполняет активный слой для восстановления плотности тока.

- **Механические повреждения:** Высокотемпературное термическое напряжение может привести к растрескиванию или схлопыванию пор вольфрамовой матрицы, влияя на диффузию бария.

Методы диагностики:

- Рентгеновская томография анализирует структуру пор для обнаружения трещин или обвалов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Механические испытания, такие как испытания на прочность на сжатие, оценивают целостность матрицы.

Стратегия улучшения:

- Оптимизируйте процесс спекания (например, уменьшите температуру спекания) для повышения прочности матрицы.
 - Для снижения термического напряжения используется ступенчатый нагрев.
 - Легирование повышает трещиностойкость.
- **Разрушение дуги:** поверхностные дефекты (например, скопление частиц, трещины) или неровные активные слои вызывают локализованное дуговое воздействие, что приводит к нестабильности излучения или повреждению поверхности.

Методы диагностики:

- Испытание на высокочастотное излучение обнаруживает колебания тока.
- СЭМ анализирует поверхностные дефекты.
- Устройства контроля дуги (например, осциллографы) регистрируют аномальные разряды.

Стратегия улучшения:

- Оптимизируйте процесс пропитки, например, контролируйте концентрацию раствора, чтобы обеспечить однородность активного слоя.
- Полировка поверхности и лазерный ремонт для удаления дефектов.
- Оптимизация конструкции электродов (например, увеличение расстояния между затворами) снижает концентрацию электрического поля и снижает риск возникновения дугового разряда.

Анализ отказов требует сочетания многотехнологической диагностики (например, XPS, SEM, X-CT, испытания на выбросы) для точного определения причины отказа. Например, в приложениях с рентгеновскими трубками регулярный анализ и активация XPS могут снизить частоту отказов. Стратегии совершенствования включают оптимизацию материалов (например, добавление антиоксидантных веществ), усовершенствование процессов (например, поэтапная активация) и контроль окружающей среды (например, высокий вакуум) для продления срока службы катода.

Таким образом, принцип работы и механизм эмиссии барий-вольфрамового катода включают теорию термоэмиссионной эмиссии, динамическое поведение активного слоя и сложное взаимодействие различных факторов окружающей среды. В этой главе представлен всесторонний анализ уравнения Ричардсона-Дюкмана, эффекта Шоттки, квантовомеханической перспективы, эмиссионных характеристик и влияющих факторов, а также закладывается основа для последующих глав, посвященных технологии производства и оптимизации производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 4: Производство и технология обработки бариевого вольфрамового катода

Технология производства и обработки бариевых вольфрамовых катодов является ключевым звеном в достижении их высокой производительности и надежности, что напрямую влияет на их эмиссионную эффективность, срок службы и стабильность в вакуумных электронных устройствах. В этой главе подробно рассматривается процесс формирования пористой вольфрамовой матрицы, процесс пропитки и активации соединений бария, а также методы контроля качества и испытаний, охватывающие весь процесс от подготовки сырья до окончательной проверки эксплуатационных характеристик.

4.1 Формование с пористой вольфрамовой матрицей

Пористая вольфрамовая матрица является основной структурой барий-вольфрамового катода, обеспечивая сеть пор для хранения соединений бария и каналы для поддержки диффузии активных атомов бария. Процесс формования требует точного контроля пористости, распределения пор по размерам и механической прочности для удовлетворения требований к высокопроизводительным катодам. В этом разделе подробно описаны процессы просеивания и прессования вольфрамового порошка, а также методы оптимизации пористости и механической прочности.

4.1.1 Процесс просеивания и прессования вольфрамового порошка

Просеивание и прессование вольфрамового порошка являются основными этапами формирования пористой вольфрамовой матрицы, которая определяет исходную микроструктуру и последующие технологические свойства матрицы. Ниже приведена подробная информация о процессе:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Просеивание вольфрамового порошка:**
 - **Выбор сырья:** Вольфрамовый порошок высокой чистоты выбирается для обеспечения химической стабильности, снижения побочных реакций или загрязнения поверхности, вызванного примесями, такими как железо, углерод или кислород. Чрезмерное содержание примесей может привести к окислению или деградации матрицы при высоких температурах.
 - **Контроль размера частиц:** Контролируйте распределение частиц вольфрамового порошка по размерам с помощью методов просеивания или классификации воздушным потоком. Диапазон размеров частиц должен быть оптимизирован в соответствии с конструкцией пор. Более мелкие порошки создают более однородную пористую структуру, что делает их пригодными для применения с высокой плотностью тока; Более грубые порошки обладают повышенной механической прочностью и подходят для длительного срока службы. Распределение частиц по размерам измеряется с помощью лазерного анализатора размера частиц для обеспечения однородности.
 - **Предварительная обработка порошка:** Чтобы удалить поверхностный оксидный слой или влагу, вольфрамовый порошок необходимо предварительно нагреть при низкой температуре в вакууме или водородной атмосфере. Предварительная обработка также улучшает сыпучесть порошка для последующего прессования.
- **Процесс прессования:**
 - **Проектирование пресс-форм:** Проектирование цилиндрических, листовых или других геометрических форм на основе катодных применений (например, микроволновых трубок или рентгеновских трубок). Поверхность пресс-формы должна быть отполирована, чтобы уменьшить количество дефектов заготовки, а материалом обычно является высокопрочная сталь или карбид, чтобы выдерживать высокое давление.
 - **Технология прессования:** Вольфрамовый порошок прессуется в заготовки с использованием технологии одноосного прессования или холодного изостатического прессования (CIP). Одноосное прессование подходит для мелкосерийного производства; Холодное изостатическое прессование создает более однородную заготовку за счет равномерного приложения давления, что делает ее пригодной для высокоточных применений. Скорость давления необходимо контролировать в процессе прессования, чтобы избежать появления трещин в заготовке.
 - **Добавление связующего:** Чтобы улучшить прочность заготовки в сыром цвете, можно добавить небольшое количество органического связующего (например, поливинилового спирта или полиметилметакрилата). Связующее вещество должно полностью улетучиваться при последующем спекании, чтобы избежать влияния остатков на пористую структуру.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Проверка заготовок:** Прессованную заготовку необходимо проверить на плотность и целостность поверхности. Плотность измеряется методом Архимеда, а поверхностные дефекты выявляются с помощью оптической микроскопии или ультразвукового контроля, что гарантирует отсутствие трещин или расслоения.
- **Оптимизация процессов:**
 - Оптимизируйте распределение частиц по размерам и давление сжатия для создания однородной исходной структуры пор. Узкое распределение частиц по размерам улучшает однородность пор, но может снизить прочность; Широкий распределение частиц по размерам повышает прочность, но может привести к неравномерной пористости.
 - Во избежание загрязнения пылью среда прессования должна контролироваться в чистом помещении (уровень ISO 7 или выше).
 - Экспериментальная проверка параметров прессования, например, использование микроскопа для наблюдения за распределением пор в сечении заготовки, чтобы убедиться, что исходная структура соответствует проектным требованиям.

Процесс просеивания и прессования должен обеспечить высокую чистоту вольфрамового порошка и структурную консистенцию заготовки, чтобы заложить основу для последующего спекания и пропитки.

4.1.2 Оптимизация пористости и механической прочности

Пористость и механическая прочность являются ключевыми параметрами производительности пористой вольфрамовой матрицы, которые необходимо оптимизировать с помощью процесса спекания и технологии контроля пор, чтобы сбалансировать емкость хранения и структурную стабильность соединений бария. Ниже приведен подробный процесс оптимизации:

- **Процесс спекания:**
 - **Среда спекания:** Спекание проводится в вакууме или атмосфере водорода высокой чистоты для предотвращения окисления вольфрамового порошка. Водородная атмосфера также удаляет остаточные связующие вещества и поверхностные оксиды.
 - **Контроль температуры:** температура спекания обычно составляет 2000–2200 °С, что ниже температуры плавления вольфрама для сохранения пористой структуры. Ступенчатый нагрев снижает термическое напряжение и предотвращает растрескивание заготовки. Время выдержки оптимизируется в зависимости от размера заготовки.
 - **Агломерационное оборудование:** Используются высокотемпературные вакуумные печи или печи с водородной защитой, оснащенные точными

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

системами контроля температуры. Атмосфера в печи должна контролироваться газоанализатором, чтобы убедиться в отсутствии загрязнения кислородом или водяным паром.

- **Образование пор:** В процессе спекания частицы вольфрама образуют прочные связи за счет поверхностной диффузии и граничных связей зерен, сохраняя при этом трехмерную связанную поровую сеть. Временные наполнители, такие как крахмал или микросферы полистирола, могут улетучиваться во время спекания, создавая дополнительную пористость.
- **Оптимизация пор:**
 - **Целевая пористость:** Контролируйте пористость, регулируя размер частиц вольфрамового порошка, давление прессования и условия спекания. Соответствующий диапазон пористости должен быть оптимизирован в соответствии с применением, а приложения с высокой плотностью тока должны иметь более высокую пористость для увеличения накопления бария; Для применения с длительным сроком службы требуется более низкая пористость для повышения прочности.
 - **Соединение пор:** Соединение поровых сетей имеет решающее значение для диффузии бария и может быть достигнуто путем управления распределением частиц по размерам (смешивание мелких и более крупных частиц) или добавления наполнителей. Рентгеновская томография (КТ) реконструирует трехмерную структуру пор и проверяет связность.
 - **Метод измерения:** Пористость измеряется с помощью ртутной интрузии или газовой адсорбции (ВЕТ), а типичная площадь поверхности оценивается методом ВЕТ. Распределение пор по размерам анализируется с помощью микроскопии или рентгенографии для обеспечения равномерного размера пор.
- **Оптимизация механической прочности:**
 - **Целевая прочность:** Матрица должна выдерживать термическое напряжение и механическую вибрацию во время работы при высоких температурах, а прочность на сжатие оценивается путем испытаний.
 - **Корректировка процесса:** Снижение температуры спекания или сокращение времени выдержки может сохранить большую пористость, но необходимо обеспечить прочность сцепления частиц. Легирующие добавки могут улучшить сцепление границ зерен и повысить прочность.
 - **Метод проверки:** Оцените механическую прочность с помощью испытаний на сжатие или растяжение, а также наблюдайте за состоянием сцепления спеченных частиц в сочетании с SEM, чтобы убедиться в отсутствии микротрещин или разрушения пор.
- **Валидация процесса:**
 - С помощью X-CT анализировали пористую структуру спеченной матрицы, чтобы убедиться, что пористость и связность соответствуют требованиям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Механические испытания в сочетании с микроструктурным анализом обеспечивают стабильность матрицы при работе при высоких температурах.
- Оптимизация процесса требует проведения итерационных экспериментов, таких как регулировка температуры спекания и соотношения наполнителя для балансировки пористости и прочности.

Оптимизация пористости и механической прочности требует точного управления процессом и многотехнологической валидации, чтобы гарантировать, что матрица соответствует структурным и функциональным требованиям высокопроизводительных катодов.

4.2 Пропитка и активация соединений бария

Пропитка и активация соединений бария является основным процессом введения активных веществ в пористую вольфрамовую матрицу и формирования активного слоя с низкой функцией работы, который напрямую влияет на характеристики эмиссии и срок службы катода. В этом разделе подробно описана формулировка и оптимизация процесса пропитки, а также методы термической обработки во время активации.

4.2.1 Процесс пропитки: рецептура соединения бария и условия пропитки

Процесс пропитки направлен на равномерное введение соединений бария в пористую сеть пористой вольфрамовой матрицы, обеспечивая непрерывную подачу активных атомов бария. Ниже приведена подробная информация о технологической цепочке и методе оптимизации:

- **Рецептура соединения бария:**

- **Выбор материала:** Обычно используемый алюминат бария-кальция широко используется благодаря своим превосходным свойствам термического разложения и химической стабильности. Рецепт высвобождает свободные атомы бария при рабочей температуре в результате следующих реакций:



побочные продукты (например, CaO, Al₂O₃) обладают высокой стабильностью и не влияют на эмиссионные свойства.

- **Оптимизация соотношения:** Отрегулируйте соотношение в соответствии с требованиями приложения. Приложения с высокой плотностью тока могут использовать высокое соотношение содержания бария для увеличения скорости высвобождения бария. Применение с длительным сроком службы может увеличить соотношение CaO или Al₂O₃ для замедления скорости разложения. Добавление антиоксидантных агентов, таких как La₂O₃ или CeO₂, улучшает антиоксидантную способность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Характеристики частиц:** Соединения бария необходимо измельчать до микронного уровня, чтобы они соответствовали размеру пор матрицы, чтобы избежать закупоривания пор или неравномерного распределения.
- **Приготовление раствора:**
 - **Выбор растворителя:** соединения бария смешиваются с деионизированной водой или органическими растворителями, такими как этанол или изопропанол, для создания суспензии. Деионизированная вода стоит недорого, но она должна быть очищена от примесей; Органические растворители могут улучшить диспергируемость, но при этом учитываются летучесть и безопасность.
 - **Дисперсионная обработка:** Высокоскоростное перемешивание или ультразвуковая обработка обеспечивают равномерное диспергирование частиц во избежание агломерации. Концентрация раствора должна быть оптимизирована, чтобы сбалансировать эффективность проницаемости и заполнение пор.
 - **Добавки:** Небольшие количества поверхностно-активных веществ, таких как полиэтиленгликоль, могут улучшить смачиваемость раствора и способствовать проникновению в поры.
- **Процесс пропитки:**
 - **Вакуумная пропитка:** пористая вольфрамовая матрица помещается в вакуумную камеру для удаления воздуха из пор, а затем вводится раствор соединения бария. Вакуумная среда повышает эффективность проникновения раствора и уменьшает количество пузырьков. Время пропитки оптимизируется в зависимости от пористости матрицы.
 - **Пропитка под давлением:** применяется к основаниям с высокой пористостью путем применения умеренного давления для облегчения проникновения раствора в поры. Давление необходимо контролировать, чтобы избежать деформации матрицы или закупорки пор.
 - **Контроль процесса:** Пропитка должна проводиться в чистом помещении (класс ISO 5 или выше) во избежание загрязнения пылью или примесями. Поверхность матрицы должна быть предварительно очищена (например, ультразвуковой очисткой) для удаления жира или оксидов.
- **Сушка:**
 - Пропитанную подложку сушат при низкой температуре для удаления растворителя. Сушку следует проводить в вакууме или инертной атмосфере, чтобы избежать реакции соединений бария с кислородом или водяным паром в воздухе.
 - Ступенчатая сушка предотвращает закупорку пор, вызванную быстрым испарением раствора. После сушки матрица должна быть проверена на приращение веса, чтобы убедиться, что наполнение из бариевого компаунда соответствует проектным требованиям.
- **Валидация процесса:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- SEM и EDS были использованы для анализа равномерности распределения соединений бария для проверки заполнения пор.
- Подтвердите количество наполнения с помощью гравиметрического анализа и осмотрите срез пор в сочетании с микроскопом, чтобы убедиться в отсутствии закупорок или пустот.
- Оптимизируйте параметры пропитки, такие как вакуум, давление и концентрация раствора, для повышения эффективности и однородности наполнения.

Процесс пропитки должен обеспечить равномерное распределение соединений бария по поровой сети, чтобы обеспечить стабильный источник бария для последующей активации.

4.2.2 Процесс активации: термическая обработка и формирование поверхностно-активного слоя

В процессе активации пропитанное соединение бария разлагается путем термической обработки и образуется активный слой с низкой функцией работы на поверхности вольфрамовой матрицы, что является ключевым этапом в достижении катодной эмиссии. Ниже приведена подробная информация о процессе:

- **Термическая обработка:**
 - **Контроль окружающей среды:** Активация выполняется в условиях высокого вакуума или инертной атмосферы (например, аргона высокой чистоты) для предотвращения окисления или загрязнения соединений бария. Вакуумные насосные системы, такие как турбомолекулярные насосы, обеспечивают низкое парциальное давление остаточного газа.
 - **Температурная процедура:** Используется ступенчатый нагрев, чтобы избежать растрескивания матрицы из-за термического напряжения. Время выдержки оптимизируется в соответствии с соотношением соединений бария. Высокие температуры вызывают разложение соединений бария, высвобождая свободные атомы бария и диффундируя на поверхность через поры.
 - **Требования к оборудованию:** Используйте высокотемпературную вакуумную печь или печь сопротивления с точной системой контроля температуры. Инфракрасные термометры контролируют температуру основания в режиме реального времени, обеспечивая равномерность.
- **Формирование слоя поверхностно-активного вещества:**
 - **Диффузия и адсорбция бария:** Свободные атомы бария диффундируют к поверхности вольфрамовой матрицы через сеть пор, образуя один атомный слой или тонкую пленку. Хемосорбированные атомы бария образуют прочную связь с поверхностью вольфрама, снижая рабочую функцию до 1,1–1,5 эВ. Физически адсорбированные атомы бария обеспечивают

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

непрерывное пополнение и поддерживают динамическое равновесие активного слоя.

- **Контроль топографии поверхности:** активный слой должен быть равномерным и непрерывным, а шероховатость поверхности должна контролироваться на низком уровне с помощью полировки. Неравномерный активный слой может привести к образованию локальных областей с высокой мощностью, что снижает эффективность выбросов.
- **Аддитивный эффект:** Добавление небольшого количества оксидов редкоземельных элементов может повысить термическую стабильность активного слоя и замедлить потери бария на испарение.
- **Оптимизация процессов:**
 - Температуру и время активации следует регулировать в соответствии с соотношением соединений бария и пористой структурой матрицы. Слишком высокая температура может ускорить испарение бария и сократить срок службы; Недостаточная активация может привести к низкому покрытию активного слоя, что повлияет на показатели выбросов.
 - Поэтапную активацию можно проводить поэтапно, стабилизируя соединение бария до формирования активного слоя.
 - После активации его необходимо охладить до комнатной температуры, чтобы избежать поверхностных дефектов, вызванных термическим напряжением.
- **Валидация процесса:**
 - Характеристики излучения активного слоя проверяются с помощью термоэмиссионных испытаний, чтобы гарантировать, что плотность тока достигает целевого значения.
 - АСМ и СЭМ анализируют рельеф поверхности для подтверждения однородности и шероховатости активного слоя.
 - XPS анализирует химический состав поверхности для проверки влияния покрытия атомами бария и снижения рабочей функции.

Процесс активации требует точного контроля температуры и окружающей среды для формирования стабильного активного слоя, обеспечивающего высокую производительность катода.

4.3 Контроль качества и испытания бариевых вольфрамовых катодов

Контроль качества и испытания являются ключевыми аспектами обеспечения стабильности и надежности катодов из бариевого вольфрама, включая испытания на выбросы, оценку соответствия и анализ отказов. В этом разделе подробно изложены методология и стандарты.

4.3.1 Метод испытаний для передачи характеристик

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Испытания на эмиссию предназначены для оценки текущей плотности, рабочей функции и стабильности выбросов бариево-вольфрамовых катодов для проверки эффективности производственного процесса. Ниже приведен подробный метод тестирования:

• **Испытание на термоэмиссионную эмиссию:**

- **Условия испытания:** В условиях высокого вакуума нагрейте катод до рабочей температуры и измерьте ток излучения с помощью анодного коллектора и прецизионного амперметра. Испытательное устройство должно быть оснащено высокоточным источником питания и системой контроля температуры.
- **Процедура испытания:** Подайте постепенно увеличивающееся анодное напряжение и запишите вольт-амперную характеристическую кривую (вольт-амперная кривая). Рассчитайте рабочую функцию с помощью уравнения Ричардсона-Душмана:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

убедитесь, что рабочая функция находится в диапазоне 1,1–1,5 эВ, а плотность тока соответствует проектным требованиям.

- **Анализ данных:** Оценка стабильности и уровня шума передаваемого тока. Аномальные колебания могут указывать на неравномерность активных слоев или загрязнение поверхности.

• **Пульсовый тест:**

- **Цель испытания:** Моделирование переходных режимов работы в мощных устройствах и оценка производительности катодов при высоких электрических полях или высоких плотностях тока.
- **Процесс тестирования:** Подайте импульсное напряжение для измерения плотности переходного тока и времени отклика. В ходе испытаний выявляется шум, издаваемый из-за поверхностных дефектов или неоднородности.
- **Требования к оборудованию:** Используйте высокочастотные импульсные источники питания и осциллографы для записи текущих осциллограмм для обеспечения точности измерений.

• **Испытание на долговечность:**

- **Условия испытаний:** непрерывная работа в течение тысяч часов в смоделированных условиях эксплуатации, контроль затухания плотности тока.
- **Процесс тестирования:** Регулярно записывайте изменения плотности тока и рабочих функций, а также рисуйте кривые снижения производительности. Тесты оценивают скорость старения и стабильность активного слоя.
- **Анализ данных:** прогнозирование срока службы катода с помощью кривых затухания для обеспечения удовлетворения потребностей приложений.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Метод верификации:**
 - Результаты испытаний должны быть сопоставлены с проектными спецификациями, например, плотность тока должна достичь целевого значения, а рабочая функция должна соответствовать ожиданиям.
 - Многократные испытания для обеспечения надежности данных, исключения ошибок оборудования или помех окружающей среды.

Испытания на характеристики выбросов проводятся в стандартизированной тестовой среде в сочетании с многопараметрическим анализом, чтобы убедиться, что характеристики катода соответствуют требованиям применения.

4.3.2 Критерии оценки согласованности и надежности

Однородность и надежность являются ключевыми требованиями к крупносерийному производству бариевых вольфрамовых катодов и оцениваются по следующим критериям:

- **Оценка соответствия:**
 - **Мониторинг параметров:** Статистический анализ плотности тока излучения, функции работы и срока службы нескольких партий катодов, а также расчет коэффициента вариации (стандартное отклонение/среднее значение). Фактор вариаций должен быть низким, чтобы обеспечить стабильную производительность от партии к партии.
 - **Проверка микроструктуры:** Анализируйте структуру пор матрицы и распределение соединений бария с помощью SEM и X-CT для обеспечения постоянной пористости и объема заполнения от партии к партии. Шероховатость поверхности измеряется с помощью АСМ.
 - **Управление технологическим процессом:** Технология статистического управления процессом (SPC) используется для контроля давления прессования, температуры спекания и параметров пропитки в режиме реального времени, а также для корректировки отклонений во времени. Контрольные графики можно использовать для отслеживания стабильности ключевых параметров.
- **Оценка надежности:**
 - **Испытание на ускоренное старение:** работает в условиях высокой температуры или высокой плотности тока для оценки ухудшения характеристик катода в экстремальных условиях. Результаты испытаний используются для расчета среднего времени наработки на отказ (MTBF) и вероятности отказа.
 - **Испытания на адаптацию к окружающей среде:** испытания в смоделированных условиях эксплуатации для проверки стабильности катода в различных средах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Разработка стандартов:** Показатели надежности разрабатываются на основе требований к применению (например, микроволновые или рентгеновские трубки).
- **Метод верификации:**
 - Объедините данные многопартийных испытаний для оценки повторяемости и стабильности производственного процесса.
 - Используйте статистическое программное обеспечение для анализа распределений параметров, чтобы убедиться в соблюдении нормальных распределений или целевых допусков.
 - Регулярно калибруйте испытательное оборудование для обеспечения точности и согласованности измерений.

Оценка соответствия и надежности требует систематических испытаний и анализа данных для обеспечения стабильности работы катодов в производстве и приложениях.

4.3.3 Анализ и улучшение сбоев

Анализ отказов направлен на выявление причин деградации или отказа катода с барьером вольфрамовым катодом и предложение целенаправленных мер по улучшению. Ниже приведены распространенные режимы отказа и методы анализа:

- **Поверхностное загрязнение:**
 - **Механизм отказа:** соединения кислорода, водяного пара или углерода вступают в реакцию с барьером с образованием соединений с высокой рабочей функцией (таких как BaO_2 или BaCO_3), снижая показатели выбросов.
 - **Методы диагностики:**
 - Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) анализирует химический состав поверхности, обнаруживает соотношение Ва/О/С и подтверждает тип загрязнения.
 - Термоэмиссионные испытания оценивают затухание плотности тока для проверки эффектов загрязнения.
 - **Меры по улучшению:**
 - Увеличьте уровень вакуума, чтобы уменьшить остаточное загрязнение газами.
 - Антитоксиканты, такие как La_2O_3 , добавляются для формирования защитного слоя.
 - Плазменная очистка используется для удаления поверхностных загрязнений.
- **Истощение барьера:**
 - **Механизм отказа:** длительная эксплуатация приводит к истощению соединений барьера, уменьшению покрытия активного слоя и повышению рабочей функции.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Методы диагностики:**
 - SEM и EDS проанализировали содержание бария и морфологию активного слоя для проверки покрытия.
 - Измерения рабочих функций (с помощью термоэмиссионных испытаний) позволяют оценить ухудшение производительности.
- **Меры по улучшению:**
 - Оптимизируйте соотношение соединений бария для увеличения накопления бария.
 - Улучшите пористость для увеличения заполняющей способности.
 - Регулярная низкотемпературная активация для пополнения активного слоя.
- **Механическая поломка:**
 - **Механизм отказа:** Термическое напряжение или механическая вибрация могут вызвать растрескивание матрицы или схлопывание пор, что влияет на диффузию бария.
 - **Методы диагностики:**
 - X-СТ анализирует структуру пор для обнаружения трещин или обвалов.
 - Механические испытания (например, испытания на сжатие) позволяют оценить прочность основания.
 - **Меры по улучшению:**
 - Оптимизируйте процесс спекания для улучшения сцепления частиц.
 - Для снижения термического напряжения используется ступенчатый нагрев.
 - Легированный ZrO₂ повышает трещиностойкость.
- **Отказ дуги:**
 - **Механизм отказа:** поверхностные дефекты или неровные активные слои вызывают локализованное дуговое воздействие, что приводит к нестабильности излучения или повреждению поверхности.
 - **Методы диагностики:**
 - СЭМ обнаруживает поверхностные дефекты, такие как скопления частиц или трещины.
 - Испытание на высокочастотное излучение (частота 1 кГц) регистрирует колебания тока.
 - Осциллограф контролирует сигнал дуги.
 - **Меры по улучшению:**
 - Оптимизированный процесс пропитки обеспечивает однородность активного слоя.
 - Полировка поверхности уменьшает количество дефектов.
 - Оптимизируйте конструкцию электродов для снижения концентрации электрического поля.
- **Метод анализа отказов:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Анализ дерева неисправностей (FTA):** Постройте дерево причин отказов для определения основных видов отказов (например, истощение бария или загрязнение поверхности) и их основных причин (например, отклонения параметров процесса).
- **Статистическое управление технологическим процессом (SPC):** анализируйте данные об отказах, выявляйте узкие места технологического процесса и оптимизируйте ключевые параметры.
- **Многометодная диагностика:** комбинируйте XPS, SEM, X-CT и эмиссионные испытания для всестороннего анализа механизмов отказов.
- **Стратегия улучшения:**
 - Оптимизируйте параметры процесса (например, температуру спекания, давление пропитки) для улучшения катодной консистенции.
 - Внедрение систем онлайн-мониторинга, таких как датчики температуры или газоанализаторы, для обнаружения отклонений от технологического процесса в режиме реального времени.
 - Создание механизма обратной связи для применения результатов анализа отказов для улучшения процессов и снижения частоты отказов.

Анализ отказов требует сочетания мультитехнологической диагностики и методов систематического анализа, чтобы гарантировать выявление основной причины и предложение эффективных мер по ее улучшению.

В этой главе подробно описывается каждый этап процесса от формирования вольфрамовой матрицы до формирования активного слоя, а также ключевые методы тестирования производительности и анализа отказов, обеспечивающие прочную техническую основу для производства и оптимизации высокопроизводительных катодов, а также гарантию процесса для последующей разработки приложений и повышения производительности.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Глава 5: Применение катода из бария и вольфрама

Бариевые вольфрамовые катоды играют ключевую роль в качестве эффективных источников термоэмиссионной эмиссии во многих высокотехнологичных областях благодаря их низкой рабочей функции, высокой плотности эмиссионного тока и превосходной термической стабильности. В этой главе подробно обсуждаются конкретные области применения бариевых вольфрамовых катодов в вакуумной электронике, научных приборах, промышленности и связи, аэрокосмической и оборонной промышленности, а также в новых и межотраслевых приложениях, а также анализируются их роль и технические требования в различных сценариях.

5.1 Вакуумная электроника

Вакуумные электронные устройства используют движение электронов в вакуумной среде для усиления сигнала, колебаний или преобразования энергии и широко используются в области связи, радиолокации и промышленности. Бариевые вольфрамовые катоды служат высокоэффективным источником электронной эмиссии, обеспечивая устойчивый поток сильноточных электронов к этим устройствам, отвечающим высоким требованиям к мощности и частоте.

5.1.1 Микроволновая трубка

Микроволновые трубки — это класс вакуумных электронных устройств, использующих электронные пучки для взаимодействия с электромагнитными полями для генерации или усиления микроволновых сигналов, которые широко используются в радарх, связи и научных экспериментах. Литрамовые катоды с бариевым покрытием незаменимы в микроволновых лампах благодаря их высокой эффективности излучения и стабильности.

5.1.1.1 Магнетрон: используется в радиолокационном и микроволновом нагревательном оборудовании

- **Введение в оборудование:** Магнетрон представляет собой мощный микроволновый генератор, который возбуждает резонатор для генерации высокочастотных микроволновых сигналов (обычно в диапазоне ГГц) путем перемещения электронов по определенной орбите под действием электрических и магнитных полей. Его основные компоненты включают катод (источник электронов), анодный резонансный резонатор и систему магнитного поля. Магнетроны широко используются в радиолокационных системах (например, метеорологических радарх, военных радарх слежения за целями) и оборудовании для микроволнового нагрева (например, в промышленных микроволновых печах, микроволновом сушильном оборудовании) благодаря их способности генерировать импульсы высокой мощности (от кВт до МВт) или непрерывные микроволновые сигналы.

Принцип работы: катод излучает электроны, образуя вращающееся электронное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

облако под действием перекрестных электрических и магнитных полей, сопряженных с анодным резонансным резонатором для генерации микроволнового сигнала определенной частоты.

- **Функция бариевого вольфрамового катода:** Бариевый вольфрамовый катод служит источником электронов магнетрона, обеспечивая высокую плотность тока электронного потока и поддерживая мощную микроволновую мощность.
- **Требования к катоду:**
 - **Высокая плотность тока:** магнетроны требуют высокой плотности передающего тока для поддержания высокой выходной мощности. Бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают стабильную эмиссию при высоких температурах для удовлетворения потребностей в электроэнергии.
 - **Быстрый отклик:** Работа радарного импульса требует, чтобы катод реагировал на высокочастотные импульсные напряжения в течение микросекунд с низким уровнем шума излучения и равномерным активным слоем.
 - **Виброустойчивость:** Механическая вибрация в военных радарх требует высокой механической прочности катодной матрицы для предотвращения коллапса пор или активного откола слоя, а процесс спекания и структура матрицы должны быть оптимизированы.
- **Технические преимущества:** Низкая рабочая функция и высокая термическая стабильность бариевых вольфрамовых катодов позволяют им работать в течение длительного времени в условиях высокой мощности и импульсов, удовлетворяя потребности магнетронов в эффективных и надежных источниках электронов.

5.1.1.2 ЛБВ: Высокочастотная связь и спутниковые усилители

- **Введение в оборудование:** Лампа бегущей волны (ЛБВ) представляет собой широкополосный микроволновый усилитель, который усиливает высокочастотные сигналы за счет взаимодействия электронных пучков с полями бегущей волны. Его основные компоненты включают катод, медленноволновую структуру, систему фокусировки электронного луча и сборный электрод. ЛБВ широко используются в спутниковой связи (усиление восходящего/нисходящего сигнала), базовых станциях 5G и системах вещания благодаря их высокому коэффициенту усиления и широкополосным характеристикам.
- **Принцип работы:** электронный пучок, испускаемый катодом, движется синхронно с входным микроволновым сигналом в медленноволновой структуре (например, по спирали), а кинетическая энергия электронного пучка передается сигналу для достижения усиления и выхода.
- **Действие барий-вольфрамового катода:** барий-вольфрамовый катод обеспечивает стабильный электронный пучок, поддерживая высокочастотное усиление сигнала лампы бегущей волны.
- **Требования к катоду:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Высокая однородность излучения:** Трубка бегущей волны нуждается в стабильном электронном луче для обеспечения качества усиления сигнала, а активный слой катода должен быть однородным и иметь низкую шероховатость поверхности во избежание искажения сигнала.
- **Долгий срок службы:** Спутниковая связь требует длительного срока службы катода, а соотношение соединений бария необходимо оптимизировать, чтобы замедлить потери бария при испарении.
- **Антитоксичность:** В космической среде могут присутствовать следовые количества остаточных газов, поэтому для поддержания работоспособности необходимо добавлять антиоксиданты.
- **Технические преимущества:** Высокая плотность тока и антиотравляющие свойства бариевых вольфрамовых катодов обеспечивают стабильность сигнала и надежность ламп бегущей волны при работе на высоких частотах и длительном сроке службы.

5.1.1.3 Клистроновая трубка: мощный радар и ускоритель частиц

- **Введение в оборудование:** Klystron - это мощный микроволновый усилитель или генератор, который генерирует или усиливает микроволновые сигналы за счет модуляции скорости электронного луча в резонансной полости. Его основные компоненты включают катод, резонансный резонатор, дрейфовую трубку и сборный электрод. Клистроновые трубки широко используются в мощных радарах (например, радарах управления воздушным движением, радарах наведения ракет) и ускорителях частиц (например, источниках синхротронного излучения, БАК ЦЕРН).

Принцип работы: Электронный пучок, испускаемый катодом, модулируется по мере прохождения через резонансный резонатор, образуя луч модуляции плотности, который преобразует кинетическую энергию в микроволновую энергию в последующей полости.

- **Действие бариевого вольфрамового катода:** Бариевый вольфрамовый катод обеспечивает высокоточный электронный пучок, поддерживая высокую выходную мощность клистроновой трубки.
- **Требования к катоду:**
 - **Сверхвысокая плотность тока:** клистроны требуются чрезвычайно высокий поток электронов для поддержания выходного сигнала на уровне МВт, а катод должен быть объединен с эффектом Шоттки для усиления излучения при высоких электрических полях.
 - **Термическая стабильность:** Колебания рабочей температуры требуют, чтобы катод поддерживал стабильную работу, а теплопроводность матрицы и термостойкость активного слоя должны быть оптимизированы.
 - **Совместимость с высоким вакуумом:** При использовании катодов со сверхвысоким вакуумом необходимо избегать ухудшения характеристик, вызванного загрязнением поверхности.
- **Технические преимущества:** Бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают стабильную эмиссию электронов в условиях высокой мощности и высокого

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электрического поля, удовлетворяя экстремальным эксплуатационным требованиям клистроновых трубок.

5.1.2 Рентгеновские трубки

Рентгеновские трубки — это вакуумные устройства, которые генерируют рентгеновские лучи путем бомбардировки металлических мишеней электронами высокой энергии, широко используются в медицине и промышленности. Бариевый вольфрамовый катод обеспечивает его высокоэффективным источником электронов.

5.1.2.1 Оборудование для медицинской визуализации (например, компьютерные томографы, рентгеновские диагностические аппараты)

- **Введение в оборудование:** Рентгеновские трубки являются основными компонентами медицинского оборудования для визуализации (такого как компьютерная томография, компьютерная томография, рентгеновские диагностические приборы), которые генерируют рентгеновские лучи путем электронной бомбардировки анодных мишеней (таких как вольфрам или молибден) для визуализации тканей человека. Его основными компонентами являются катод, анод и вакуумный корпус. Компьютерные томографы генерируют трехмерные изображения с помощью многоугольных рентгеновских проекций, а диагностические рентгеновские аппараты используются для исследования костей или мягких тканей.
Как это работает: катод излучает электроны, которые бомбардируют анод под действием ускорения высоковольтного электрического поля, производя характерные рентгеновские лучи и непрерывные спектральные рентгеновские лучи для рентгеноскопической визуализации.
- **Действие бариевого вольфрамового катода:** Бариевый вольфрамовый катод обеспечивает высокоэнергетический электронный пучок, который генерирует высококачественный рентгеновский сигнал.
- **Требования к катоду:**
 - **Высокая стабильность излучения:** для получения изображения требуется стабильный поток электронов, а катод должен быть равномерно излучаемым, чтобы уменьшить колебания тока.
 - **Быстрый старт:** диагностическое оборудование должно запускаться быстро, а катод должен достигать рабочей температуры и стабильно излучать за короткое время.
 - **Долгий срок службы:** Медицинское оборудование требует длительного срока службы катода, и это необходимо для оптимизации хранения бария и защиты от отравлений.
- **Технические преимущества:** Высокая плотность тока и быстродействующие способности бариево-вольфрамовых катодов обеспечивают точность визуализации и надежность рентгеновских трубок, отвечающих высоким стандартам медицинских устройств.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.2.2 Промышленный неразрушающий контроль

- **Введение в оборудование:** Рентгеновские трубки используются в промышленном неразрушающем контроле для обнаружения внутренних дефектов (таких как трещины, пористость), качества сварных швов или структуры электронных компонентов. Он работает аналогично медицинским рентгеновским трубкам, но требует более высокой рентгеновской энергии для проникновения в толстые металлы или композиты. Сценарии применения включают инспекцию авиационных компонентов, анализ сварных швов трубопроводов и инспекцию полупроводниковых корпусов.

Как это работает: высокоэнергетический электронный пучок бомбардирует мишень для генерации рентгеновских лучей, которые улавливаются детектором после передачи образца, формируя изображение внутренней структуры.

- **Действие бариевого вольфрамового катода:** Бариевый вольфрамовый катод обеспечивает высокоинтенсивный электронный пучок, поддерживая генерацию высокоэнергетических рентгеновских лучей.
- **Требования к катоду:**
 - **Высокая выходная мощность:** промышленный контроль требует высокоэнергетических рентгеновских лучей, а катоды должны обеспечивать высокую плотность тока.
 - **Адаптивность к окружающей среде:** Промышленные среды могут испытывать вибрацию или изменения температуры, а катоды должны обладать высокой механической прочностью и термической стабильностью.
 - **Устойчивость к загрязнениям:** Неидеальные условия вакуума требуют усиления защиты катода от отравления с помощью добавок.
- **Технические преимущества:** Прочность и высокая эмиссионная эффективность бариевых вольфрамовых катодов делают их пригодными для сложных условий промышленного контроля, обеспечивая высококачественные рентгеновские сигналы.

5.1.3 Прочие вакуумные устройства

- **Фотоумножитель :**
 - **Введение в оборудование:** Фотоумножитель (ФЭУ) представляет собой высокочувствительный фотоприемник, преобразующий слабые световые сигналы в электрические сигналы, которые широко используются в детекторах излучения (например, для детектирования гамма-лучей), астрономических наблюдений и подсчета фотонов в научных экспериментах. Его основные компоненты включают фотокатод, электронный умножитель и анод.
 - **Принцип работы:** фотокатод поглощает фотоны и испускает электроны, которые усиливаются умножителем и собираются анодом для формирования обнаруживаемого электрического сигнала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Действие литрамового катода с барием:** обеспечивает высокочувствительную эмиссию электронов и поддерживает генерацию начальных фотоэлектрических сигналов.
- **Требования к катодам:** Для обеспечения точности обнаружения фотонов требуется чрезвычайно низкий уровень шума излучения и малое время отклика.
- **Технические преимущества:** Низкий уровень шума и высокая чувствительность бариевых вольфрамовых катодов делают их идеальными источниками электронов для фотоумножителей.
- **Оборудование для электронно-лучевой сварки:**
 - **Введение в оборудование:** Оборудование для электронно-лучевой сварки использует высокоэнергетические электронно-лучевые расплавленные материалы для высокоточной сварки, которая широко используется в аэрокосмической, автомобильной и атомной промышленности. Его основные компоненты включают катод, электронно-оптическую систему и вакуумную камеру.

Принцип работы: Электронный луч, испускаемый катодом, ускоряется и фокусируется в высоком вакууме, бомбардируя заготовку для создания локальной высокой температуры и достижения сварки глубоким расплавом.
 - **Действие литрамового катода с барием:** Обеспечивает высокоэнергетический электронный пучок, который поддерживает сварку глубоким расплавом.
 - **Требования к катодному уровню:** требуется высокая плотность тока и стабильная фокусировка электронного пучка, а также необходимо точно контролировать рабочую температуру во избежание перегрева.
 - **Технические преимущества:** Высокая эффективность выбросов и стабильность бариевых вольфрамовых катодов обеспечивают точность и эффективность сварки.

5.2 Научные инструменты

Бариевые вольфрамовые катоды служат в качестве высокоэффективных источников электронов в научных приборах, поддерживая задачи визуализации и анализа с высоким разрешением, отвечающие требованиям высокой точности и чувствительности.

5.2.1 Электронный микроскоп

- **Введение в оборудование:** Электронный микроскоп использует электронно-лучевую визуализацию и делится на сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ). СЭМ сканирует поверхность образца с помощью электронного пучка, собирает вторичные электроны или обратно рассеянные электроны для формирования изображения рельефа поверхности с разрешением в нанометрах; ПЭМ проникает в ультратонкие образцы электронным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пучком для получения изображений внутренних структур с разрешением вплоть до субнангстрема. Оба широко используются в материаловедении, биологии и исследованиях в области нанотехнологий.

Как это работает: электронный пучок, испускаемый катодом, ускоряется электрическим полем и фокусируется магнитным полем, сканируется (SEM) или проникает (TEM) и захватывается детектором для создания изображения с высоким разрешением.

- **Действие литрамового катода с барием:** обеспечивает электронный пучок высокой яркости и поддерживает субнаноразмерную визуализацию.
- **Требования к катоду:**
 - **Высокая яркость:** для достижения высокого разрешения требуется высокая плотность тока и низкий уровень шума излучения.
 - **Стабильность:** Долгосрочная визуализация требует низких колебаний эмиссионного тока, а однородность активного слоя должна быть оптимизирована.
 - **Совместимость с вакуумом:** Сверхвысокий вакуум требует высокой устойчивости катода к загрязнению.
- **Технические преимущества:** Высокая яркость и стабильность бариевого вольфрамового катода делают его идеальным источником электронов для СЭМ и ПЭМ.

5.2.2 Масс-спектрометр: высокочувствительный источник ионов

- **Введение в оборудование:** Масс-спектрометр - это аналитический прибор, который определяет молекулярный состав и структуру путем ионизации молекул образца и измерения их отношения массы к заряду, и широко используется в химическом анализе, мониторинге окружающей среды и биомедицинских исследованиях. Его основными компонентами являются источник ионов, масс-анализатор и детектор.

Принцип работы: катод испускает электроны для бомбардировки молекул образца, а после генерации ионов они разделяются электрическими или магнитными полями, а молекулярные формы обнаруживаются в соответствии с отношением массы к заряду.

- **Катодное действие бариевого вольфрама:** обеспечивает стабильный поток электронов для ионизации образца.
- **Требования к катоду:**
 - **Высокая чувствительность:** для повышения эффективности ионизации требуется постоянный поток электронов с низкой энергией, а катод должен работать при более низких температурах.
 - **Длительный срок службы:** аналитические задачи должны выполняться в течение длительных периодов времени, а катоды необходимо удлинять за счет оптимизации соотношения бария.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Технические преимущества:** Низкая рабочая функция и высокая эмиссионная эффективность барий-вольфрамового катода обеспечивают высокую чувствительность и долговременную стабильность масс-спектрометра.

5.2.3 Оборудование для анализа поверхности

- **Введение в оборудование:** Оже-электронный спектрометр (AES) и рентгеновский фотоэлектронный спектрометр (XPS) - это приборы для анализа поверхности, используемые для изучения химического состава и электронной структуры поверхностей материалов. AES генерирует оже-электроны, возбуждая образец электронным пучком для анализа элементарных веществ; XPS возбуждает фотоэлектроны с помощью рентгеновских лучей, измерительных элементов и химических состояний. Оба широко используются в материаловедении и исследованиях полупроводников.

Как это работает: катод, излучающий электроны, или источник рентгеновского излучения возбуждает образец и собирает излучаемые электроны для энергетического спектрального анализа.

- **Катодное действие бария-вольфрама:** Обеспечивает стабильный электронный пучок (AES) для поддержки высокоточного анализа поверхности.
- **Требования к катоду:**
 - **Высокая точность:** требуется стабильный поток электронов с низкой энергией, а катод должен обеспечивать равномерное излучение и низкие шумовые характеристики.
 - **Совместимость со сверхвысоким вакуумом:** катод должен предотвращать загрязнение поверхности.
- **Технические преимущества:** Равномерная эмиссия и устойчивость к загрязнению бариевых вольфрамовых катодов делают их пригодными для задач высокоточного анализа поверхности.

5.3 Промышленные и коммуникационные приложения

Бариевые вольфрамовые катоды поддерживают мощные электронные источники и функции усиления сигнала в промышленной и коммуникационной областях, удовлетворяя потребности в высокой надежности и эффективности.

5.3.1 Радиолокационная система

- **Введение в оборудование:** Радиолокационная система определяет положение цели и скорость путем передачи и приема микроволновых сигналов и делится на военные радары (такие как радар ПВО, радар наведения ракет) и гражданские радары (такие как управление воздушным движением, метеорологический радар). Его основные компоненты включают микроволновый источник (например, магнетрон или клистрон), антенну и сигнальный процессор.

Принцип работы: Электронный луч, излучаемый катодом, генерирует мощный

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроволновый сигнал в микроволновой трубке, который отражается обратно на детектор после передачи антенной.

- **Действие бариевого вольфрамового катода:** обеспечивает мощный поток электронов и поддерживает генерацию микроволнового сигнала.
- **Требования к катодному:**
 - **Высокая выходная мощность:** для поддержки передачи сигнала высокой мощности требуется высокая плотность тока.
 - **Устойчивость к вибрации:** Мобильные платформы (например, корабельные радары) требуют высокой механической прочности катодной матрицы.
 - **Быстрый отклик:** импульсный радар должен быть быстро запущен катодом и стабильно передаваться.
- **Технические преимущества:** Высокая эмиссионная эффективность и прочность бариевого вольфрамового катода делают его идеальным источником электронов для радиолокационных систем.

5.3.2 Коммуникационное оборудование

- **Внедрение оборудования:** Усилители спутниковой связи и наземных базовых станций используются для передачи сигнала на большие расстояния, полагаясь на лампы бегущей волны или твердотельные усилители для усиления высокочастотных сигналов. Спутниковая связь поддерживает глобальные сети связи, а наземные базовые станции используются для 5G и систем вещания.

Принцип работы: Электронный луч, излучаемый катодом, усиливает входной сигнал в трубке бегущей волны и выдает сигнал высокой мощности.

- **Катодное действие бария и вольфрама:** Обеспечивает стабильный поток электронов, поддерживая усиление сигнала.
- **Требования к катодному:**
 - **Стабильность высоких частот:** требуется низкий уровень шума потока электронов, а активный слой катода должен быть однородным.
 - **Долгий срок службы:** Спутниковая связь требует длительного срока службы катода, а также необходимо оптимизировать эффективность защиты от отравления и испарения.
- **Технические преимущества:** Бариевые вольфрамовые катоды поддерживают высокочастотное усиление сигнала и длительную работу, отвечая высоким требованиям надежности коммуникационного оборудования.

5.3.3 Трубка вакуумного переключателя

- **Введение оборудования:** Вакуумная коммутационная трубка представляет собой высоковольтное коммутационное устройство, используемое для автоматических выключателей, распределения мощности и управления нагрузкой в системах электроснабжения, обеспечивая быстрое переключение с помощью электронного управления. Его основные компоненты включают катод, анод и вакуумный корпус.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Принцип работы: катод излучает электроны, образуя дугу или включенный ток при высоком напряжении для реализации переключения цепи.

- **Действие барий-вольфрамового катода:** обеспечивает поток электронов высоким током и поддерживает быструю работу переключения.
- **Требования к катодному:**
 - **Высокая плотность тока:** Требуется поддержка работы с коммутацией высокого тока.
 - **Сопротивление дуге:** необходимо избежать образования дуги, вызванной поверхностными дефектами, и оптимизировать рельеф поверхности.
- **Технические преимущества:** Высокая эффективность излучения и стабильность бариевых вольфрамовых катодов делают их пригодными для высоковольтных и мощных коммутационных приложений.

5.4 Аэрокосмическая и оборонная промышленность

Бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают высокую надежность и производительность электроники в аэрокосмической и оборонной промышленности для удовлетворения требований экстремальных условий.

5.4.1 Космические электронные устройства

- **Введение в оборудование:** Космические электронные устройства включают в себя модули связи, двигательные установки и научные приборы в зондах дальнего космоса и спутниках, которые должны работать в экстремальных вакуумных и радиационных условиях. Типичные области применения включают электронные источники для спутниковых систем связи (например, спутники GPS) и зонды (например, марсоходы).

Принцип работы: Катод обеспечивает поток электронов, поддерживая усиление сигнала связи или ионизацию топлива.

- **Действие бариевого вольфрама и вольфрама:** Обеспечивает высоконадежный источник электронов для поддержки долгосрочных космических миссий.
- **Требования к катодному:**
 - **Адаптивность к экстремальным условиям:** он должен стабильно работать в условиях космического вакуума и радиации.
 - **Длительный срок службы:** Цикл миссии составляет до нескольких лет, и хранение бария необходимо оптимизировать для продления срока службы.
 - **Низкое энергопотребление:** Для экономии энергии требуется низкая мощность нагрева.
- **Технические преимущества:** Высокая надежность и низкая рабочая функция бариевых вольфрамовых катодов делают их предпочтительным выбором для применения в космосе.

5.4.2 Система электронного противодействия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Введение в оборудование:** Системы радиоэлектронного противодействия используют мощные микроволновые сигналы для глушения или нарушения работы коммуникаций, радаров или электронного оборудования противника, включая мощное микроволновое оружие и глушители. Его основным компонентом является микроволновый источник (например, кластрон или магнетрон).
Принцип работы: Электронный луч, излучаемый катодом, генерирует мощный микроволновый сигнал, который излучает мешающую цель через направленную антенну.
- **Действие барий-вольфрамового катода:** обеспечивает сверхмощный поток электронов и поддерживает генерацию микроволнового сигнала.
- **Требования к катодному:**
 - **Сверхвысокая мощность:** Требуется чрезвычайно высокая плотность тока для поддержки выходного напряжения на уровне МВт.
 - **Быстрый отклик:** Импульсная работа требует быстрого запуска и стабильного излучения.
- **Технические преимущества:** Бариевые вольфрамовые катоды обеспечивают стабильный поток электронов при сильных электрических полях и высоких мощностях, удовлетворяя потребности встречных систем.

5.5 Новые и междоменные приложения

Бариевые вольфрамовые катоды демонстрируют обширный потенциал в новых технологических областях, поддерживая передовые исследования и междисциплинарные приложения.

5.5.1 Генератор терагерцовых волн

- **Введение в оборудование:** Генератор терагерцовых волн генерирует терагерцовые волны для терагерцовой визуализации (например, в целях безопасности, медицинской диагностики) и высокоскоростной связи. Его основные компоненты включают электронный источник и генератор (например, трубку бегущей волны или клистроновую трубку).
Принцип работы: Электронный пучок, испускаемый катодом, колеблется в высокочастотном поле, генерируя терагерцовые волны.
- **Катод с бариевым вольфрамовым катодом:** обеспечивает высокочастотный электронный пучок и поддерживает генерацию терагерцовых волн.
- **Требования к катодному:**
 - **Высокочастотная характеристика:** необходимо поддерживать сильное излучение с высоким полем в сочетании с туннельным эффектом.
 - **Стабильность:** требуется низкий уровень шума при высоком вакууме и высоких температурах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Технические преимущества:** Низкая рабочая функция и высокая плотность тока бариевых вольфрамовых катодов делают их пригодными для высоких требований генераторов терагерцовых волн.

5.5.2 Ионные двигатели

- **Введение в оборудование:** Ионные двигатели представляют собой высокоэффективные космические двигательные установки с малой тягой, которые генерируют ионные пучки с помощью ионизирующего топлива (например, ксенона) для обеспечения микротяги (уровни от μN до mN) для управления ориентацией зондов дальнего космоса или спутников.

Принцип работы: катод испускает электронно-ионизирующее топливо, а ионы выбрасываются после того, как электрическое поле ускоряется для создания тяги.

- **Катод с барием и вольфрамом:** обеспечивает высокоэффективный источник электронов и поддерживает ионизацию топлива.
- **Требования к катодному:**
 - **Высокая эффективность:** Для повышения эффективности ионизации требуется эффективный поток электронов.
 - **Долгая жизнь:** Миссии в дальний космос требуют нескольких лет эксплуатации.
- **Технические преимущества:** Высокая эффективность выбросов и длительный срок службы барий-вольфрамового катода обеспечивают низкое энергопотребление и длительную работу ионного двигателя.

5.5.3 Эксперименты по физике высоких энергий

- **Описание устройства:** Ускорители частиц, такие как БАК ЦЕРНа, ускоряют заряженные частицы через электрические и магнитные поля для исследований в области физики высоких энергий. Его источник электронов используется для генерации исходного пучка частиц или вспомогательного пучка.

Принцип работы: Электронный пучок, испускаемый катодом, ускоряется и впрыскивается в ускоритель для участия в эксперименте по столкновению частиц.

- **Действие бариевого вольфрама и вольфрама:** Обеспечивает сильноточный источник электронов для поддержки генерации пучка частиц.
- **Требования к катодному:**
 - **Сверхвысокая плотность тока:** Необходимо поддерживать пучки частиц высокой энергии.
 - **Стабильность:** Он должен работать в течение длительного времени при сверхвысоком вакууме.
- **Технические преимущества:** Высокая производительность и стабильность бариевых вольфрамовых катодов соответствуют экстремальным условиям экспериментов по физике высоких энергий.

5.5.4 Биомедицинские приложения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Внедрение оборудования:** Высокоточный масс-спектрометрический анализ используется для диагностики заболеваний (таких как ранний скрининг рака, выявление метаболических заболеваний) путем определения отношения массы к заряду биомаркеров. Его основным компонентом является источник ионов масс-спектрометра.
Принцип работы: катод испускает электроны для бомбардировки биологических образцов, а ионы генерируются и анализируются с помощью масс-спектрометрии.
- **Действие бария-вольфрама на катоде:** Обеспечивает стабильный поток электронов и поддерживает высокочувствительную ионизацию.
- **Требования к катодному:**
 - **Высокая чувствительность:** требует стабильного потока электронов с низкой энергией.
 - **Низкий уровень шума:** для обеспечения точности анализа требуется очень низкий уровень шума излучения.
- **Технические преимущества:** Высокая чувствительность и низкий уровень шума бариевых вольфрамовых катодов делают их идеальными источниками электронов для биомедицинского масс-спектрометрического анализа.

Таким образом, бариевые вольфрамовые катоды показали широкий спектр применения в вакуумной электронике, научных приборах, промышленности и связи, аэрокосмической и оборонной промышленности, а также в новых областях благодаря своей низкой рабочей функции, высокой плотности тока и превосходной стабильности. В этой главе подробно знакомятся с принципами работы оборудования для каждого сценария применения и их техническими требованиями к катодам, разъясняется ключевая роль катодов из бариевого вольфрама в содействии развитию высокотехнологичных областей, а также приводится ориентированный на применение эталон для последующей оптимизации производительности и междисциплинарных исследований.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6: Оптимизация и улучшение характеристик катода из бариевого вольфрама

Оптимизация характеристик и улучшение характеристик бариевых вольфрамовых катодов являются ключом к улучшению их характеристик в вакуумной электронике и высокотехнологичных приложениях, направленных на повышение эффективности выбросов, продление срока службы, повышение адаптивности к окружающей среде и обеспечение интеллектуального проектирования. В этой главе подробно обсуждается оптимизация пористой структуры пористой вольфрамовой матрицы, рецептура новых соединений бария, применение нанотехнологий, антиоксидантные процессы, улучшение термической и механической стабильности, маломощное экологически чистое производство и интеллектуальные технологии мониторинга, охватывающие полный спектр стратегий от проектирования материалов до оптимизации процессов.

6.1 Повышение эффективности запуска

Повышение эмиссионной эффективности бариевых вольфрамовых катодов является основной целью оптимизации их характеристик, включая увеличение плотности тока излучения, снижение рабочей функции и улучшение однородности излучения электронов. В этом разделе обсуждается оптимизация пористой структуры пористой вольфрамовой матрицы, рецептура и легирование новых соединений бария, а также применение нанотехнологий.

6.1.1 Оптимизация пористой структуры пористой вольфрамовой матрицы

Пористая структура пористой вольфрамовой матрицы напрямую влияет на скорость диффузии атомов бария и эффективность формирования активного слоя, а эффективность эмиссии может быть значительно улучшена за счет оптимизации пористости и связности.

- **Регулирование пористости:**
 - **Цель оптимизации:** Сбалансировать накопление соединений бария и механическую прочность матрицы путем регулировки пористости. Высокая пористость увеличивает накопление бария, что способствует высокой плотности излучения тока. Низкая пористость повышает прочность при длительном сроке службы.
 - **Метод обработки:** Мелкий вольфрамовый порошок смешивается с более крупными частицами для формирования бимодального распределения пор и улучшения связности. Временные наполнители, такие как микросферы полистирола, улетучиваются во время спекания, создавая однородную поровую сеть.
 - **Оптимизация параметров спекания:** отрегулируйте температуру спекания, скорость нагрева и продолжительность выдержки, чтобы частицы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

связывались, сохраняя поры. Вакуумная или водородная атмосфера предотвращает окисление.

- **Улучшенное подключение к порам:**
 - **Технические средства:** Контролируя распределение частиц вольфрамового порошка по размерам и давление прессования, образуется трехмерная связанная поровая сеть, способствующая диффузии атомов бария на поверхность.
 - **Метод верификации:** рентгеновская томография (рентгеновская томография) реконструирует структуру пор для подтверждения связности; Методом давления ртути измеряется пористость и распределение пор по размерам.
- **Улучшение производительности:** оптимизированная структура пор может повысить эффективность диффузии бария, увеличить покрытие активного поверхностного слоя, уменьшить рабочую функцию и увеличить плотность передаваемого тока.
- **Валидация процесса:** Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) используется для наблюдения за поперечными сечениями пор в сочетании с термотронными эмиссионными испытаниями для оценки характеристик излучения для обеспечения однородности и стабильности.

Оптимизация структуры пор должна быть достигнута с помощью точной порошковой металлургии и процессов спекания, чтобы обеспечить структурную основу для эффективного выброса.

6.1.2 Рецепт и технология легирования новых соединений бария

Новые составы соединений бария и методы легирования оптимизируют образование и стабильность активного слоя, снижают рабочую функцию и повышают эффективность выбросов.

- **Новая рецептура соединения бария:**
 - **Корректировка формулы:** традиционный алюминат бария и кальция ($4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 4:1:1) увеличивает содержание бария за счет регулировки молярного соотношения и ускоряет скорость высвобождения свободного бария, что делает его пригодным для применений с высокой плотностью тока. Низкое содержание бария замедляет разложение и подходит для длительного срока службы.
 - **Альтернативные соединения:** Изучите силикаты бария (например, Ba_2SiO_4) или титанаты бария (например, BaTiO_3) в качестве альтернативы из-за их более стабильных свойств термического разложения в определенном температурном диапазоне и снижения интерференции побочных продуктов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Оптимизация частиц:** измельчение соединений бария до субмикронного уровня, чтобы соответствовать размеру пор матрицы, улучшить однородность пропитки и увеличить покрытие активного слоя.
- **Технология легирования:**
 - **Выбор легирующих примесей:** Оксиды редкоземельных элементов (такие как La_2O_3 , CeO_2 , <2 мас.%) были добавлены для повышения термической стабильности активного слоя и снижения рабочей функции. La_2O_3 образует комплексы Ва-La-O с низкой рабочей функцией, а CeO_2 улучшает антиоксидантную способность.
 - **Метод легирования:** легирующую примесь смешивают с соединением бария и измельчают для получения суспензии, или ее вводят через вторичную пропитку после пропитки для обеспечения равномерного распределения. Ультразвуковое диспергирование предотвращает агломерацию.
 - **Механизм действия:** Легирующие примеси снижают рабочую функцию, изменяя электронную структуру поверхности, препятствуя испарению бария и продлевая срок службы активного слоя.
- **Улучшение эксплуатационных характеристик:** Новые составы и методы легирования снижают рабочую функцию, увеличивают плотность передаваемого тока и улучшают однородность излучения.
- **Верификация процесса:** Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) была использована для анализа химического состава поверхности и подтверждения распределения легирующей примеси. Термоэмиссионные испытания подтверждают увеличение рабочей функции и плотности тока.

Новые рецептуры и методы легирования должны быть экспериментально оптимизированы для обеспечения совместимости с пористой структурой матрицы.

6.1.3 Применение нанотехнологий

Нанотехнологии повышают эффективность эмиссии барий-вольфрамовых катодов за счет создания наноразмерных структур с использованием наноразмерных бариевых покрытий и нанопористых вольфрамовых матриц.

- **Наноразмерное бариевое покрытие:**
 - **Метод подготовки:** Атомно-слоевое осаждение (ALD) или химическое осаждение из газовой фазы (CVD) используется для нанесения наноразмерных покрытий из оксида бария на поверхность вольфрамовой матрицы. ALD использует $\text{Ba}(\text{C}_3\text{H}_7\text{O}_2)_2$ в качестве прекурсора и осаждается слой за слоем при определенной температуре для обеспечения однородности.
 - **Преимущества:** Нанопокрyтия увеличивают покрытие поверхности атомов бария, снижают рабочую функцию и уменьшают потери на испарение бария.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокая удельная площадь поверхности покрытия повышает эффективность эмиссии электронов.

- **Управление процессом:** Осаждение следует проводить в высоком вакууме, чтобы контролировать скорость осаждения и избегать слишком толстого слоя покрытия, чтобы закупорить поры.
- **Нанопористая вольфрамовая матрица:**
 - **Способ приготовления:** Нанопоры образуются на поверхности вольфрамовой матрицы методом электрохимического травления или трафаретными методами (например, шаблонами из анодированного алюминия). В методе шаблона используется шаблон Al_2O_3 для удаления шаблона после осаждения вольфрама методом химического осаждения из газовой фазы, усиленного плазмой (PECVD).
 - **Преимущества:** Нанопоры увеличивают удельную площадь поверхности, улучшают эффективность хранения и диффузии бария, а также увеличивают плотность тока излучения.
 - **Технологические проблемы:** нанопоры должны поддерживать связность, чтобы избежать коллапса; Прочность матрицы усиливается за счет легирования ZrO_2 .
- **Улучшенная производительность:** Нанотехнологии могут повысить эффективность выбросов, снизить рабочую функцию и улучшить однородность выбросов.
- **Метод верификации:** атомно-силовая микроскопия (АСМ) для анализа морфологии покрытия и подтверждения шероховатости; SEM и X-CT для обнаружения нанопористых структур; Испытания на передачу подтверждают повышенную плотность тока.

Нанотехнологии должны учитывать стоимость подготовки и масштабируемость, но их потенциал для значительного улучшения производительности делает их горячей точкой исследований.

6.2 Продление срока службы

Продление срока службы является важным направлением для оптимизации катода вольфрама с барием, включая процессы защиты от отравления и улучшения термической стабильности и механической прочности для замедления старения и разрушения.

6.2.1 Процесс борьбы с отравлениями

Процесс защиты от ядов замедляет старение активного слоя за счет повышения устойчивости катода к загрязнителям окружающей среды.

- **Механизм загрязнения антиоксидантами:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Источники загрязнения:** Остаточные газы (такие как O_2 , H_2O , CO_2) вступают в реакцию с поверхностным барьером с образованием высокомолекулярных функциональных соединений (таких как BaO_2 , $BaCO_3$), что снижает показатели выбросов.
- **Политика защиты:**
 - **Добавьте антиокислительные агенты:** легированные оксидами редкоземельных элементов (такими как Sc_2O_3 , Y_2O_3) для образования защитного слоя и ингибирования реакции барьера с кислородом. Sc_2O_3 образует стабильный комплекс $Ba-Sc-O$, снижающий скорость окисления.
 - **Поверхностное покрытие:** Наносит тонкий слой оксида, такого как Al_2O_3 , путем физического осаждения из газовой фазы (PVD) в качестве барьера, предотвращая проникновение загрязняющих веществ.
 - **Постаптивационная обработка:** После активации низкотемпературный отжиг образует стабильный слой адсорбции барьера для повышения способности к защите от загрязнения.
- **Оптимизация процессов:**
 - Пропитка и активация выполняются в сверхвысоком вакууме для снижения первоначального загрязнения.
 - Используйте соединения барьера высокой чистоты и чистые помещения, чтобы избежать попадания примесей.
- **Улучшение производительности:** Процесс защиты от отравления продлевает срок службы катода в вакуумной среде и снижает скорость затухания передаваемого тока.
- **Метод проверки:** XPS анализирует химический состав поверхности и обнаруживает содержание загрязнений; Испытания на ускоренное старение оценивают антиокислительные свойства.

Процесс борьбы с отравлением требует сочетания защитных мер для обеспечения долгосрочной стабильности катода в неидеальных условиях.

6.2.2 Повышение термической стабильности и механической прочности

Улучшенная термическая стабильность и механическая прочность снижают испарение барьера и разрушение конструкции при работе при высоких температурах, продлевая срок службы катода.

- **Улучшения термической стабильности:**
 - **Оптимизация соединений барьера:** использование высокотермически стабильных соединений барьера, таких как Ba_2SiO_4 , которые разлагаются при более высокой температуре, чем обычные составы, замедляя испарение барьера.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Усиление легирования:** ZrO_2 или HfO_2 добавляется в матрицу или активный слой для ингибирования испарения атомов бария при высоких температурах и улучшения силы связывания активного слоя с матрицей.
- **Оптимизация процесса активации:** Пошаговая активация образует однородный активный слой, снижая потери бария при высокотемпературной активации.
- **Улучшение механической прочности:**
 - **Упрочнение матрицы:** Улучшите граничное сцепление зерен вольфрамовой матрицы путем легирования Re или ThO_2 для повышения прочности на сжатие.
 - **Оптимизация спекания:** снижает температуру спекания и продлевает время удержания тепла, что приводит к более плотным связям частиц и уменьшению количества микротрещин.
 - **Структура пор:** Градиентная структура пор (высокая пористость на поверхности, низкая пористость внутри) уравнивает прочность и потребности в хранении бария.
- **Улучшение производительности:** улучшенная термическая стабильность продлит срок службы катода при высоких температурах; Повышенная механическая прочность для работы в условиях высокой вибрации (например, военные радары).
- **Метод верификации:** Для оценки скорости испарения бария использовался термогравиметрический анализ (ТГА). Испытание на сжатие и РЭМ для наблюдения за прочностью и микроструктурой матрицы; Испытания на долговечность подтверждают долгосрочную работоспособность.

Повышение термической стабильности и механической прочности достигается за счет синергетической оптимизации материалов и процессов.

6.3 Адаптация к окружающей среде

Повышение экологической адаптивности бариевых вольфрамовых катодов позволяет им работать в экстремальных условиях и с учетом требований экологичного производства, включая экстремальные экологические характеристики и конструкцию с низким энергопотреблением.

6.3.1 Производительность в экстремальных условиях

Экстремальные условия (например, космический вакуум, высокая радиация, температурные циклы) предъявляют более высокие требования к характеристикам катода, требуя оптимизированных материалов и конструкций для обеспечения стабильности.

- **Космический вакуум и радиация:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Стратегия оптимизации:** Добавьте антирадиационные добавки для повышения антирадиационной повреждающей способности матрицы и активного слоя. Поверхность покрыта покрытием ZrO_2 для защиты от излучающих частиц.
- **Совместимость с вакуумом:** активировать и герметизировать катод в сверхвысоком вакууме, снижая остаточное загрязнение газами.
- **Температурные циклы:**
 - **Стратегия оптимизации:** Для снижения термического напряжения используется вольфрамовая матрица с низким коэффициентом теплового расширения. Ступенчатый нагрев позволяет избежать растрескивания активного слоя.
 - **Метод проверки:** Термоциклические испытания оценивают снижение производительности.
- **Среда с высокой вибрацией:**
 - **Стратегия оптимизации:** Сформируйте матрицу высокой плотности с помощью холодного изостатического прессования для повышения устойчивости к вибрации. Конструкция с градиентными порами повышает прочность конструкции.
- **Улучшенная производительность:** оптимизированный катод может стабильно работать в вакууме, в условиях сильного излучения и вибрации, а его срок службы увеличен.
- **Метод проверки:** Испытание на моделирование окружающей среды (излучение, вакуум, вибрация) в сочетании с испытанием на выбросы для подтверждения стабильности работы.

Оптимизация экстремальных условий окружающей среды требует всестороннего рассмотрения материалов, процессов и структурного проектирования.

6.3.2 Низкое энергопотребление и экологичное производство

Низкое энергопотребление и экологичное производство являются важными направлениями в современном катодном проектировании, направленном на снижение энергопотребления и воздействия на окружающую среду.

- **Конструкция с низким энергопотреблением:**
 - **Сниженная рабочая температура:** Рабочая функция уменьшается за счет легирования Sc_2O_3 или La_2O_3 , чтобы катод обеспечивал высокую плотность тока при рабочей температуре, снижая мощность нагрева.
 - **Эффективная структура нагрева:** Разработайте матрицу с высокой теплопроводностью с оптимизированными нагревателями, такими как нить Mo , для повышения тепловой эффективности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Метод проверки:** Термоэмиссионное испытание оценивает низкотемпературные характеристики; Тепловизионный анализ равномерности нагрева.
- **Зеленое производство:**
 - **Экологически чистые материалы:** Используйте нетоксичные добавки, такие как CeO_2 , чтобы уменьшить вред окружающей среде. Восстанавливайте вольфрамовый порошок и соединения бария для снижения расхода сырья.
 - **Энергосберегающий процесс:** Низкотемпературное спекание и высокоэффективная пропитка (вакуумное погружение) используются для снижения энергопотребления.
 - **Переработка отходов:** Создание системы рекуперации жидких отходов на основе соединений бария для восстановления ионов Ba^{2+} путем химического осаждения и сокращения выбросов.
- **Улучшенная производительность:** конструкция с низким энергопотреблением снижает мощность нагрева; Сократите потребление энергии и выбросы отходов от «зеленого» производства.
- **Метод верификации:** анализ энергопотребления оценивает эффективность производства и эксплуатации; Оценка воздействия на окружающую среду (LCA) подтверждает эффективность «зеленого» производства.

Низкое энергопотребление и экологичное производство требуют баланса между производительностью и экологическими преимуществами.

6.4 Разумный замысел

Интеллектуальная конструкция повышает производительность катода за счет мониторинга в режиме реального времени и динамической регулировки, включая интеграцию датчиков и адаптивное управление.

- **Мониторинг датчиков:**
 - **Тип датчика:** Встроенные миниатюрные датчики температуры (например, термопары) и современные датчики контролируют состояние катода. Датчики давления обнаруживают изменения в вакуумной среде.
 - **Способ установки:** Датчик встраивается в катодную матрицу или корпус вакуумного устройства и передает данные через микросхему.
 - **Параметры мониторинга:** Регистрация рабочей температуры, передающего тока и вакуума в режиме реального времени для прогнозирования старения или загрязнения активного слоя.
- **Динамическая настройка:**
 - **Система управления:** Разработайте систему обратной связи на основе микроблока управления (MCU) для регулировки мощности нагрева или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

условий активации на основе данных датчиков. Например, когда ток излучения падает на $>5\%$, запускается низкотемпературная активация дополнительного атома бария.

- **Адаптивные алгоритмы:** используйте модели машинного обучения для анализа исторических данных, оптимизации рабочих параметров и продления срока службы.
- **Улучшенная производительность:** Интеллектуальная конструкция продлевает срок службы катода и снижает количество случайных отказов.
- **Метод верификации:** Имитационное рабочее испытание для оценки точности датчика и реакции системы управления; Анализ отказов подтверждает эффективность интеллекта.

Интеллектуальное проектирование решает проблему миниатюризации датчиков и сложности обработки данных, но его потенциал значителен.

Таким образом, оптимизация производительности и улучшение катода из бариевого вольфрама значительно повышают эффективность выбросов, срок службы и адаптацию к окружающей среде за счет оптимизации структуры пор, новых составов, нанотехнологий, процесса защиты от отравления, улучшения термомеханической стабильности, экологически чистого производства с низким энергопотреблением и интеллектуального дизайна. В этой главе представлен систематический технический маршрут разработки высокопроизводительных катодов, закладывающий основу для технических задач и будущего развития следующей главы.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Глава 7: Вызовы и будущее развитие

Являясь высокоэффективным источником термоэмиссионной эмиссии, бариевый вольфрамовый катод занимает важное место в области вакуумных электронных устройств и высоких технологий, но его разработка сталкивается с техническими узкими местами, такими как стоимость материалов, стабильность производительности и стабильность цепочки поставок, а также находится под конкурентным давлением со стороны холодных катодов и других технологий горячих катодов. В этой главе представлен глубокий анализ текущих технических проблем, обсуждается конкурентная среда новых технологий и прогнозируются будущие направления исследований барий-вольфрамовых катодов, охватывающие новые материалы и процессы, интеллектуальное проектирование и междисциплинарные исследования.

7.1 Текущие технические узкие места

Широкое применение бариевых вольфрамовых катодов ограничено узкими местами, такими как стоимость материала, сложность приготовления, стабильность производительности и стабильность цепочки поставок, которые ограничивают их конкурентоспособность в высокопроизводительных устройствах и массовом производстве.

7.1.1 Стоимость материалов и сложность подготовки

- **Описание задачи:**

- **Дорогостоящее сырье:** Бариевые вольфрамовые катоды основаны на соединениях вольфрама и бария высокой чистоты, которые могут быть дорогими. Вольфрамовый порошок необходимо тщательно просеивать, чтобы обеспечить равномерный размер частиц, а соединения бария необходимо синтезировать с высокой чистотой, что значительно увеличивает затраты на материалы.
- **Сложные процессы подготовки:** Процесс порошковой металлургии пористой вольфрамовой матрицы (включая прессование и высокотемпературное спекание), а также процесс пропитки и активации соединений бария включают в себя многоступенчатые высокоточные операции. Высокотемпературное спекание требует строгого вакуума или инертной атмосферы, пропитка и активация требуют чистой окружающей среды, инвестиций в оборудование и высокого энергопотребления.
- **Чувствительность процесса:** Небольшие отклонения в пористости, бариевой упаковке и условиях активации могут значительно повлиять на характеристики выбросов, что приводит к увеличению затрат на проб и ошибок.

- **Воздействие:** Высокая стоимость и сложность ограничивают использование бариевых вольфрамовых катодов в чувствительных к стоимости приложениях, таких

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

как бытовое микроволновое оборудование, и повышают барьер для входа для малых и средних предприятий.

- **Потенциальное решение:**
 - Изучите недорогие альтернативные материалы, такие как легирование недорогими металлами, такими как молибден, для сокращения использования вольфрама, или используйте более экономичные составы соединений бария.
 - Оптимизируйте технологический процесс и упростите этапы прессования и погружения с помощью автоматизированного оборудования для умеренного снижения энергопотребления.
 - Создание стандартизированных спецификаций процессов в сочетании с технологией статистического управления процессами (SPC) значительно снижает колебания параметров и повышает эффективность производства.

7.1.2 Стабильность производительности и проблемы массового производства

- **Описание задачи:**
 - **Вариации от партии к партии:** Структура пор, заполнение соединением бария и однородность активного слоя пористой вольфрамовой матрицы варьируются от партии к партии, что приводит к колебаниям характеристик выбросов и влияет на надежность устройства.
 - **Сложность масштабирования процесса:** При мелкомасштабной лабораторной подготовке можно достичь высокой консистенции, но в промышленном производстве трудно поддерживать однородность в условиях прессования, спекания и пропитки, что приводит к неравномерной производительности.
 - **Сложность контроля качества:** Для испытаний на выбросы требуется среда с высоким вакуумом и прецизионные инструменты, что делает процесс тестирования трудоемким и дорогостоящим. Анализ отказов (например, диагностика поверхностного загрязнения) требует сочетания нескольких технологий, что усложняет контроль качества.
- **Воздействие:** Нестабильная производительность ограничивает доверие к бариевым вольфрамовым катодам в высоконадежных приложениях (например, спутниковая связь, ускорители частиц) и препятствует широкомасштабной индустриализации.
- **Потенциальное решение:**
 - Внедрение технологий онлайн-мониторинга, таких как определение пористой структуры в режиме реального времени и мониторинг температуры, значительно повышает стабильность процесса.
 - Разработайте высокопроизводительную тестовую платформу, сочетающую в себе автоматизированное тестирование выбросов и анализ машинного зрения для быстрой оценки согласованности партий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Оптимизируйте производственные процессы для обеспечения стабильных партий сырья и значительного снижения вариативности производительности с помощью методов, основанных на данных, таких как Six Sigma.

7.1.3 Проблемы в цепочке поставок

- **Описание задачи:**
 - **Дефицит сырья:** ресурсы вольфрама и бария ограничены, глобальные запасы сосредоточены в нескольких регионах, а цепочки поставок подвержены геополитическим и рыночным колебаниям.
 - **Логистика и хранение:** Высокочистый вольфрамовый порошок и соединения бария требуют особых условий хранения (влажность и окисление), а транспортировка на большие расстояния может привести к появлению примесей или увеличению затрат.
 - **Экологическое и нормативное давление:** Производство и утилизация отходов соединений бария связаны с потенциально токсичными веществами, которые требуют соблюдения строгих экологических норм, что увеличивает затраты на соблюдение требований.
- **Воздействие:** Нестабильность цепочки поставок может привести к нехватке сырья или колебаниям цен, что повлияет на производственные планы и контроль затрат, а также ограничит процесс индустриализации.
- **Потенциальное решение:**
 - Разработка технологии извлечения вольфрама и бария из отработанных катодов для умеренного снижения зависимости от сырой руды.
 - Создание диверсифицированной цепочки поставок, сотрудничество с транснациональными поставщиками и диверсификация геополитических рисков.
 - Продвигайте экологически чистые химические процессы, используйте нетоксичные альтернативы или эффективные технологии обработки отходов для защиты окружающей среды.

7.2 Конкурс новых технологий

Бариевые вольфрамовые катоды конкурируют с холодными катодами и другими технологиями горячих катодов, а их рыночная позиция зависит от их способности сохранять свои технические преимущества и адаптироваться к разнообразным потребностям применения.

7.2.1 Технология холодного катода

- **Описание конкурентной технологии:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Катод из углеродных нанотрубок (УНТ):** используя характеристики полевой эмиссии углеродных нанотрубок, они излучают электроны через сильные электрические поля без нагрева, предлагая преимущества низкого энергопотребления, быстрого отклика и миниатюризации, что делает их пригодными для миниатюрных электронных устройств, таких как плоские дисплеи и портативные источники рентгеновского излучения.
- **Другие полевые эмиссионные катоды,** такие как графен, нанопроволока из оксида цинка и передовые матричные катоды, основаны на высоком эффекте усиления электрического поля наноструктур для обеспечения высокой плотности эмиссионного тока и широко используются в новых областях.
- **Потенциал применения:** Холодные катоды постепенно вытесняют традиционные горячие катоды в маломощных и миниатюризированных устройствах, угрожая некоторым рынкам бариевых вольфрамовых катодов.
- **Конкурентные вызовы:**
 - **Преимущество в низком энергопотреблении:** холодный катод не требует нагрева, что значительно снижает энергопотребление, что делает его пригодным для портативных и экологически чистых приложений.
 - **Снижение производственных затрат:** технология получения углеродных нанотрубок и графена становится все более совершенной, а стоимость постепенно снижается, повышая конкурентоспособность на рынке.
 - **Ограничения:** Плотность тока излучения и срок службы холодных катодов, как правило, ниже, чем у бариевых вольфрамовых катодов, а стабильность излучения поля подвержена поверхностному загрязнению, что усложняет конструкцию устройства из-за высоких требований к электрическому полю.
- **Стратегия реагирования на бариевый вольфрамовый катод:**
 - Увеличьте преимущества высокой мощности и подчеркните незаменимость бариевых вольфрамовых катодов в системах с высокой плотностью тока и длительным сроком службы (например, в микроволновых трубках, рентгеновских трубках).
 - Разработка маломощных барий-вольфрамовых катодов для сокращения разрыва в энергопотреблении с холодными катодами за счет оптимизации рабочей функции и рабочей температуры.
 - Расширьте области с высокой надежностью, такие как космическая электроника, для повышения устойчивости к излучению и вибрации.

7.2.2 Прочие тепловые катоды

- **Описание конкурентной технологии:**
 - **Оксидные катоды:** основанные на покрытиях из оксида бария или оксида стронция, они имеют низкую стоимость и более низкие рабочие температуры, что делает их пригодными для маломощных приложений (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

небольших трубок), но они обладают низкой токсичностью и долговечностью.

- **Катод гексаборида лантана (лабораторный):** обеспечивает эмиссию электронов высокой яркости и подходит для электронной микроскопии с высоким разрешением, но имеет высокую рабочую температуру и высокие затраты на подготовку.
- **Легированные вольфрамовые катоды:** такие как легированные рением или торием вольфрамовые катоды, подходят для высокотемпературных и высокопрочных сред, но эффективность эмиссии ниже, чем у бариевых вольфрамовых катодов.
- **Конкурентные вызовы:**
 - **Компромисс между стоимостью и производительностью :** оксидные катоды доминируют на рынке недорогих автомобилей, но имеют ограниченную производительность; Катоды LaV конкурируют с барий-вольфрамовыми катодами в приложениях с высокой яркостью, но с более высоким энергопотреблением и стоимостью.
 - **Конкуренция в конкретных областях:** катоды LaV угрожают доле рынка барий-вольфрамовых катодов в электронной микроскопии, в то время как оксидные катоды оказывают давление на рынок низкого ценового сегмента.
- **Стратегия реагирования на бариевый вольфрамовый катод:**
 - Оптимизируйте соотношение производительности и затрат для снижения затрат за счет упрощения процесса подготовки при сохранении высокой эффективности выбросов и увеличения срока службы.
 - Улучшенная функция с низким энергопотреблением и тепловая стабильность для высокопроизводительных приложений (например, микроволновых трубок, ускорителей частиц).
 - Ознакомьтесь с конструкциями композитных катодов, которые сочетают в себе преимущества оксида или LaV₆ для разработки универсальных катодов.

7.2.3 Анализ конкурентных преимуществ бариевых вольфрамовых катодов

- **Преимущества:**
 - **Высокая эффективность выбросов:** Низкое энергопотребление и высокая плотность тока делают его превосходным в мощной вакуумной электронике.
 - **Длительный срок службы:** оптимизированное хранение бария и конструкция с защитой от отравления значительно увеличивают время безотказной работы при высоких требованиях к надежности (например, при спутниковой связи).
 - **Технологическая зрелость:** десятилетия накопления процессов и хорошо налаженная цепочка индустриализации обеспечивают ее конкурентоспособность в традиционных областях.
- **Недостатки:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Более высокое энергопотребление и затраты на подготовку ограничивают их применение на рынках с низким энергопотреблением и низкой стоимостью.
- Производительность чувствительна к окружающей среде и требует строгих условий пылесоса и очистки.
- **Стратегическое позиционирование:**
 - Консолидация рынков мощных и высоконадежных приборов, таких как микроволновые трубки, рентгеновские трубки и космическая электроника.
 - Экспансия в новые области (например, терагерцовые источники) за счет технологических инноваций (например, нанотехнологии, маломощное проектирование).
 - Разработка композитных катодов для горячих полей в сочетании с преимуществами низкого энергопотребления холодных катодов для повышения общей конкурентоспособности.

7.3 Будущие направления исследований

Будущее развитие бариевых вольфрамовых катодов должно преодолеть существующие узкие места, адаптироваться к потребностям новых технологий, исследовать новые материалы и процессы, интеллектуальное проектирование и междисциплинарные исследования, а также расширить перспективы их применения.

7.3.1 Исследование новых материалов и процессов

- **Новые материалы:**
 - **Альтернативные материалы матриц:** Разработка вольфрамовых матриц, легированных молибденом или рением, для умеренного снижения затрат и улучшения теплопроводности и механической прочности. Узнайте больше о карбиде вольфрама или керамических подложках для повышения устойчивости к высокотемпературному окислению.
 - **Новые соединения бария:** Исследуйте новые составы, такие как силикат бария или диоксид циркония бария, для оптимизации свойств и стабильности термического разложения, а также снижения влияния побочных продуктов на эмиссионные свойства.
 - **Функциональные добавки:** Разработка новых антиокислительных агентов (таких как оксид скандия) для формирования комплексов с низкой трудоемкостью и повышения устойчивости к излучению.
- **Новый процесс:**
 - **Эффективная технология пропитки:** Электрохимическая или плазменная пропитка улучшает однородность наполнения из соединения бария, значительно сокращая время процесса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Низкотемпературное спекание:** снижение температуры спекания за счет добавления нанокатализаторов, снижение энергопотребления и сохранение пористой структуры.
- **Аддитивное производство:** использует технологию 3D-печати для точного управления пористыми структурами вольфрамовой матрицы, повышая гибкость конструкции и однородность пор.
- **Ожидаемые результаты:** Новые материалы и процессы могут значительно повысить эффективность выбросов, снизить рабочую функцию и умеренно снизить затраты на подготовку.
- **Метод валидации:** Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (ХПС) были использованы для анализа микроструктуры и химического состава поверхности материала в сочетании с термоэмиссионными испытаниями для оценки улучшения характеристик.

7.3.2 Интеллектуальное и адаптивное проектирование катодов

- **Разумный замысел:**
 - **Интеграция датчиков:** встроенные крошечные датчики температуры, тока и вакуума для мониторинга работы катода в режиме реального времени и прогнозирования тенденций старения или загрязнения.
 - **Динамическое управление:** Разработайте систему обратной связи на основе микроблока управления для динамической регулировки мощности нагрева или условий активации на основе данных в режиме реального времени, продлевая срок службы.
 - **Анализ данных:** используйте модели машинного обучения для анализа эксплуатационных данных, оптимизации параметров процесса и значительного повышения операционной эффективности.
- **Адаптивный дизайн:**
 - **Адаптация к окружающей среде:** Динамически реагирует на остаточное газовое загрязнение путем химических модификаций поверхности, таких как покрытия из диоксида циркония, повышая устойчивость к окружающей среде.
 - **Многорежимная работа:** Разрабатывайте катоды, поддерживающие режимы как высокого, так и низкого энергопотребления, адаптируясь к различным потребностям приложений.
- **Ожидаемый результат:** Интеллектуальная конструкция значительно продлевает срок службы катода, снижает количество незапланированных отказов и повышает стабильность работы.
- **Метод верификации:** Оцените надежность системы управления с помощью долгосрочных эксплуатационных испытаний и проверьте адаптивный эффект в сочетании с анализом отказов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.3 Междисциплинарные исследования

- **В сочетании с искусственным интеллектом:**
 - **Оптимизация процессов:** ускорение исследований и разработок за счет оптимизации рецептур соединений бария и условий активации с помощью моделирования молекулярной динамики на основе искусственного интеллекта.
 - **Прогнозирование производительности:** Влияние множества параметров на производительность излучения анализируется нейронной сетью, что значительно сокращает экспериментальный период.
- **В сочетании с квантовыми вычислениями:**
 - **Material design:** Используйте квантовые вычисления для моделирования электронной структуры границы раздела барий-вольфрам и разработки материалов со сверхнизкой рабочей функцией.
 - **Исследование механизма излучения:** Изучить вклад квантового туннельного эффекта в сильное излучение с высоким полем и разработать композитный катод с горячим полем.
- **Интеграция с другими дисциплинами:**
 - **Нанотехнологии:** Комбинируйте такие методы, как атомно-слоевое осаждение (ALD), для разработки наноразмерных активных слоев для повышения эффективности выбросов.
 - **Биомедицина:** оптимизация характеристик барий-вольфрамовых катодов в высокоточной масс-спектрометрии для поддержки диагностики заболеваний.
 - **Новая энергия:** Исследуйте ее потенциал в плазменных генераторах, используемых в технологиях ядерного синтеза или топливных элементов.
- **Ожидаемые результаты:** Междисциплинарные исследования могут значительно расширить перспективы применения барий-вольфрамовых катодов в области терагерцовых волн, квантовых устройств и новой энергетики.
- **Метод верификации:** Проверяйте новые материалы и процессы с помощью междисциплинарных совместных экспериментов, а также оценивайте междоменные характеристики в сочетании с практическими прикладными испытаниями.

Подводя итог, можно сказать, что разработка барий-вольфрамовых катодов сталкивается с такими проблемами, как стоимость материалов, стабильность производительности, стабильность цепочки поставок и конкуренция со стороны новых технологий, но благодаря синергетическому продвижению новых материалов и процессов, интеллектуальному проектированию и междисциплинарным исследованиям, его потенциал в высокопроизводительной вакуумной электронике и новых областях по-прежнему широк.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 8: Стандарты катодов с барием и вольфрамом

Стандартизация является ключом к обеспечению стабильных эксплуатационных характеристик, надежности производства и экологической безопасности бариевых вольфрамовых катодов, обеспечивая единую техническую основу для их применения в вакуумной электронике и высокотехнологичных областях. В этой главе подробно обсуждаются международные и отраслевые стандарты (включая китайские национальные и отраслевые стандарты), технические характеристики эксплуатационных параметров, стандарты производства и контроля качества, а также стандарты охраны окружающей среды и безопасности, связанные с бариевыми вольфрамовыми катодами.

8.1 Международные и отраслевые стандарты

Стандартизация катодов бариевого вольфрама опирается на международные организации по стандартизации (например, IEC, ISO), китайские национальные стандарты (GB) и отраслевые стандарты (например, IEEE, MIL-STD, ASTM и китайские отраслевые стандарты) для обеспечения единых спецификаций для выбора материалов, производственных процессов и эксплуатационных испытаний.

8.1.1 Международные стандарты, относящиеся к бариевым вольфрамовым катодам

- **IEC 60601-1 Медицинское электрооборудование - Часть 1: Общие требования к базовой безопасности и основным эксплуатационным характеристикам**
 - **Описание:** Этот стандарт определяет требования к безопасности и производительности медицинского электрооборудования, включая технические характеристики бариевых вольфрамовых катодов в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рентгеновских трубках, такие как плотность тока излучения, срок службы и требования к вакуумной среде.

- **Пригодность:** Подходит для медицинского оборудования визуализации (например, компьютерных томографов, рентгенодиагностических аппаратов), гарантируя, что катод обеспечивает стабильную эмиссию электронов при высокой выходной мощности, отвечая требованиям точности визуализации и безопасности пациента.
- **Основные требования:** катод должен обеспечивать высокую плотность передающего тока, низкие колебания тока, поддерживать высокий вакуум (менее 10^{-6} Па) в рабочей среде для предотвращения отравления, а ресурсные испытания должны имитировать реальные условия эксплуатации.
- **Руководство по внедрению:** Производители должны проверять характеристики катода с помощью высокоточных амперметров и вакуумметров, а процесс тестирования должен соответствовать условиям окружающей среды и безопасности, указанным в стандарте.
- **IEC 60050 Международный электротехнический словарь**
 - **Описание:** Настоящий стандарт обеспечивает единообразное определение терминов для области электротехники, включая технические термины для тепловых катодов, таких как бариевые вольфрамовые катоды, такие как рабочая функция, эмиссионный ток и активный слой.
 - **Применимость:** Обеспечивает терминологическую согласованность при разработке, испытаниях и документировании катодов с бариевым вольфрамовым катодом, обеспечивая трансграничную связь и точность технической документации.
 - **Ключевые требования:** Терминология должна быть четко определена, а стандартная лексика должна использоваться в отчетах об испытаниях и руководствах по продуктам, чтобы избежать двусмысленности.
 - **Руководство по внедрению:** Специалисты по исследованиям и разработкам и производители должны написать техническую документацию на основе стандарта IEC 60050, чтобы обеспечить стандартизацию терминологии.
- **ISO 9001 Системы менеджмента качества – Требования**
 - **Описание:** Настоящий стандарт определяет требования к системе менеджмента качества, регулирующей контроль качества и управление процессами при производстве бариевых вольфрамовых катодов.
 - **Пригодность:** Подходит для производства бариевого вольфрамового катода в промышленных неразрушающих и научных приборах, обеспечивая однородность партии и надежность продукта.
 - **Основные требования:** Производственная среда должна соответствовать стандартам чистых помещений (например, ISO Level 5), испытательное оборудование должно регулярно калиброваться, а производственные записи должны быть полными, охватывающими источник сырья и технологические параметры.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Руководство по внедрению:** Производителям, сертифицированным по стандарту ISO 9001, необходимо создать комплексную систему управления качеством и регулярно проверять процессы для обеспечения стабильности производства.
- **ISO 20431 Вакуумная техника - Калибровка вакуумметров**
 - **Описание:** Данный стандарт определяет метод калибровки испытательного оборудования (например, вакуумметров) в вакуумной среде, обеспечивая точность испытаний катодов с бариевым вольфрамовым катодом.
 - **Применимость:** подходит для катодного контроля в условиях высокого вакуума (например, в микроволновых трубках, электронных микроскопах) для обеспечения надежных результатов измерений.
 - **Основные требования:** Вакуумметр должен регулярно калиброваться, в испытательной среде должен поддерживаться сверхвысокий вакуум (менее 10^{-8} Па), а точность измерений должна соответствовать стандартным требованиям.
 - **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо контролировать тестовую среду с помощью откалиброванных вакуумметров и записывать данные калибровки для обеспечения прослеживаемости.
- **IEC 60335-2-24 Бытовые и аналогичные электроприборы - Безопасность - Часть 2-24: Особые требования к холодильным приборам, приборам для мороженого и льдогенераторам**
 - **Описание:** Несмотря на то, что в основном это относится к бытовым приборам, некоторые главы настоящего стандарта посвящены требованиям безопасности тепловых катодов в вакуумных электронных устройствах, которые могут косвенно применяться к контролю рабочей среды катодов с барием и вольфрамом.
 - **Применение:** Обеспечение безопасных эксплуатационных характеристик бариевых вольфрамовых катодов в гражданском оборудовании (например, микроволновом нагревательном оборудовании) для обеспечения стабильности работы.
 - **Основные требования:** катод должен работать в высокотемпературной и вакуумной среде, чтобы предотвратить дуговой разряд и испарение материала.
 - **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо разработать систему вакуумной сварки, чтобы гарантировать, что рабочая среда катода соответствует требованиям стандарта.
- **ISO 19444-1 Вакуумная техника - Стандартные методы измерения производительности вакуумных систем - Часть 1: Общие требования**
 - **Описание:** Настоящий стандарт определяет методы проектирования и эксплуатационных испытаний вакуумных систем и применим к управлению рабочей средой с бариевым вольфрамовым катодом.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Применимость:** Руководство проектированием вакуумных систем в микроволновых и рентгеновских трубках, обеспечивая стабильную работу бариевых вольфрамовых катодов в условиях высокого вакуума.
- **Основные требования:** Вакуумные системы должны поддерживать низкую скорость утечки (менее 10^{-9} Па·м³/с), а метод испытаний должен быть стандартизирован.
- **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо регулярно проверять производительность системы с помощью вакуумных насосов, соответствующих стандартам, и технологий герметизации.

8.1.2 Отраслевые стандарты, относящиеся к бариевым вольфрамовым катодам

- **IEEC 161 Стандартные определения терминов для электронных ламп**

- **Описание:** Этот стандарт определяет термины в вакуумной электронике, включая такие эксплуатационные параметры, как рабочая функция, плотность эмиссионного тока и термическая стабильность.
- **Применимость:** Предоставляет терминологические спецификации для оценки характеристик барий-вольфрамовых катодов в микроволновых лампах (например, магнетронах, лампах бегущей волны) и радиолокационных системах, особенно для мощных и высокочастотных приложений.
- **Основные требования:** Катод должен обеспечивать стабильные характеристики излучения в указанном температурном диапазоне, испытание должно имитировать высокочастотные импульсные условия для проверки способности к быстрому реагированию, а вибростойкость должна соответствовать стандартам.
- **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо проверять характеристики катода с помощью рекомендованного IEEC испытательного оборудования, такого как высокочастотные испытательные платформы, чтобы обеспечить соответствие требованиям к коммуникационному и радиолокационному оборудованию.

- **Стандарт IEEC 287 для методов тестирования микроволновых трубок**

- **Описание:** Настоящий стандарт определяет методы испытаний катодов в микроволновых трубках, включая испытания на характеристики излучения, срок службы и пригодность катодов с бариевым вольфрамом для окружающей среды.
- **Применимость:** Подходит для мощных микроволновых устройств (таких как магнетроны, квилитрумы), обеспечивая стабильную работу катодов в условиях высокой частоты и высокой мощности.
- **Основные требования:** Испытания должны проводиться в условиях высокого вакуума, имитируя импульсы или непрерывные режимы работы для проверки плотности и стабильности передаваемого тока.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Руководство по внедрению:** Для проведения испытаний следует использовать высокоточные приборы (например, амперметры, анализаторы спектра), а записанные данные должны соответствовать стандартным форматам.
- **MIL-STD-810 Соображения по инженерии окружающей среды и лабораторные испытания**
 - **Описание:** Настоящий стандарт определяет методы испытаний электронных устройств в экстремальных условиях (например, при высокой вибрации, радиации, температурных циклах) и охватывает требования к эксплуатационным характеристикам бариевых вольфрамовых катодов.
 - **Пригодность:** Литрамовые катоды с барием подходят для аэрокосмической и оборонной отраслей, таких как спутниковая связь и системы электронного противодействия, обеспечивая их надежность в сложных условиях.
 - **Основные требования:** Катод должен поддерживать стабильную работу в условиях высокой радиации и сверхвысокого вакуума, ресурсные испытания должны охватывать длительную эксплуатацию и условия воздействия окружающей среды, а механическая прочность должна соответствовать стандартам ударопрочности.
 - **Руководство по внедрению:** Поставщики должны проводить испытания по моделированию окружающей среды (например, вибростендов, радиационного облучения), чтобы убедиться, что катод соответствует военным стандартам.
- **Стандарт метода испытаний MIL-STD-202 для электронных и электрических компонентов**
 - **Описание:** Данный стандарт определяет методы испытаний электронных компонентов, включая испытания на срок службы, надежность и пригодность катодов из бариевого вольфрама для использования в окружающей среде.
 - **Применение:** Подходит для бариевых вольфрамовых катодов в военном и аэрокосмическом применении, обеспечивая их стабильность работы в экстремальных условиях.
 - **Основные требования:** В ходе испытания необходимо смоделировать реальную рабочую среду, оценить характеристики выбросов и старения катода, а данные должны быть подробно записаны для поддержки анализа надежности.
 - **Руководство по внедрению:** Производители должны использовать стандартизированное испытательное оборудование в сочетании с испытаниями на ускоренное старение для проверки долгосрочных характеристик катодов.
- **ASTM F83 Стандартная методика определения и определения термоэмиссионных констант электронных излучателей**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Описание:** Настоящий стандарт определяет термоэмиссионные константы термоэмиссионных излучателей (например, рабочую функцию, плотность эмиссионного тока) и определяет методы измерения.
- **Пригодность:** Непосредственно применимо для испытаний на работоспособность бариевых вольфрамовых катодов, особенно в мощных электронных устройствах.
- **Основные требования:** Испытание должно проводиться в условиях высокого вакуума с использованием стандартизированного термоэмиссионного испытательного оборудования.
- **Руководство по внедрению:** Производители должны разрабатывать свои процессы испытаний с учетом стандартов, чтобы обеспечить точность и повторяемость результатов измерений.
- **Стандартные определения IEEE C37.30 для высоковольтных распределительных устройств и устройств управления**
 - **Описание:** Настоящий стандарт определяет терминологию и требования к испытаниям электронных компонентов в высоковольтных распределительных устройствах, частично применимые к бариево-вольфрамовым катодам в вакуумных распределительных устройствах.
 - **Применимость:** Руководство по оценке эксплуатационных характеристик катодов в вакуумных коммутационных трубках, обеспечивая их стабильность в условиях высокого напряжения.
 - **Основные требования:** Катод должен обеспечивать стабильную эмиссию электронов в условиях высокого напряжения и высокого вакуума, а при испытании необходимо имитировать условия импульсов переключения.
 - **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо использовать высоковольтные испытательные платформы для проверки производительности катода и соответствия требованиям стандарта.
- **GB 4943.1-2022 Оборудование для информационных технологий - Безопасность - Часть 1: Общие требования**
 - **Описание:** Этот китайский национальный стандарт основан на стандарте IEC 62368-1:2018 и определяет требования безопасности к информационно-технологическому оборудованию, включая электрические и тепловые характеристики электронных устройств, таких как бариевые вольфрамовые катоды.
 - **Применимость:** Подходит для безопасного проектирования и испытаний бариевых вольфрамовых катодов в информационно-технологическом оборудовании (например, электронных микроскопах, вакуумных трубках).
 - **Основные требования:** Катод должен соответствовать требованиям к электрической изоляции и термической стабильности, а условия эксплуатации должны предотвращать возникновение дуги и перегрев.
 - **Руководство по внедрению:** Производители должны отправить образцы катодов в сертифицированную ССС лабораторию для тестирования, чтобы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечить соответствие стандартам и завершить продление сертификации до 1 августа 2023 года.

- **GB/T 3797-2016 Условия окружающей среды для электрических и электронных изделий - Часть 2: Методы испытаний**
 - **Описание:** Этот китайский промышленный стандарт определяет методы климатических испытаний электрических и электронных продуктов, включая испытания на высокую температуру, высокую влажность и вибрацию, подходящие для проверки характеристик бариевых вольфрамовых катодов.
 - **Применимость:** Руководство по эксплуатационным испытаниям бариевых вольфрамовых катодов в экстремальных условиях, например, в радиолокационном и аэрокосмическом оборудовании.
 - **Основные требования:** Катод должен поддерживать стабильность излучения при высоких температурах (≤ 2000 °C) и высоком вакууме, а устойчивость к вибрации должна соответствовать стандартам.
 - **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо использовать оборудование для климатических испытаний (например, шейкеры, термоамплификаторы) для проверки характеристик катода и соответствия требованиям стандартов.
- **JB/T 6842-2018 Общие технические условия для вакуумных электронных устройств**
 - **Описание:** Этот китайский стандарт машиностроения определяет общие технические требования и методы испытаний для вакуумных электронных устройств (таких как микроволновые трубки, содержащие бариевые вольфрамовые катоды, рентгеновские трубки).
 - **Применение:** Подходит для испытаний на производительность и надежность бариевых вольфрамовых катодов в вакуумной электронике.
 - **Основные требования:** Катод должен соответствовать требованиям к плотности тока излучения, сроку службы и уровню вакуума, а испытание должно имитировать реальные условия эксплуатации.
 - **Руководство по внедрению:** Производители должны проверять характеристики катода с помощью стандартизированного испытательного оборудования, такого как высоковакуумные испытательные платформы, чтобы обеспечить соответствие отраслевым требованиям.

8.2 Технические характеристики катода с барием и вольфрамом

Технические характеристики эксплуатационных параметров содержат количественные критерии для оценки и применения бариевых вольфрамовых катодов, включая определение ключевых параметров и методов испытаний.

8.2.1 Требования стандартизации по ключевым параметрам

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Плотность излучаемого тока:**
 - **Определение:** Поток электронов, испускаемый поверхностью катода на единицу площади, отражающий эффективность излучения катода.
 - **Стандартные требования:** Устройства высокой мощности (такие как тахлистронные трубки) должны удовлетворять потребности в высокой плотности тока с низкими колебаниями, в соответствии со стандартами ASTM F83 и JB/T 6842-2018.
 - **Типичные области применения:** Микроволновые трубки требуют высокой плотности передающего тока для поддержания высокой выходной мощности; Электронным микроскопам требуется низкий уровень шума для обеспечения точности изображения.
- **Должностные обязанности:**
 - **Определение:** Минимальная энергия, необходимая для вылета электронов с поверхности катода, определяющая эффективность излучения и рабочую температуру.
 - **Стандартные требования:** Рабочая функция должна быть как можно ниже, чтобы снизить мощность нагрева при сохранении стабильности в соответствии с ASTM F83.
 - **Типичные области применения:** Маломощные функции подходят для маломощных приложений (например, в космической электронике).
- **Продолжительность жизни:**
 - **Определение:** время, в течение которого катод сохраняет стабильное излучение при определенных условиях (например, при температуре, вакууме).
 - **Требования стандарта:** Приложения с длительным сроком службы (например, спутниковая связь) должны отвечать потребностям приложений с длительным сроком службы, длительным временем работы и низким ухудшением производительности в соответствии со стандартами MIL-STD-202 и JB/T 6842-2018.
 - **Типичные области применения:** Радары и космические устройства требуют длительного срока службы для снижения затрат на техническое обслуживание.
- **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо выбрать соответствующий диапазон параметров для сценария применения, например, высокую мощность или высокую надежность, и разработать спецификации испытаний со ссылкой на стандарты IEC 60601-1, IEEE 287, ASTM F83 и JB/T 6842-2018.

8.2.2 Методы испытаний и процессы верификации

- **Испытание на пористость пористой вольфрамовой матрицы:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Методы:** Пористость и распределение пор по размерам измеряли с помощью ртутного излучения или рентгеновской томографии (КТ) для обеспечения связности пор и емкости накопления бария.
- **Стандартные требования:** Пористость должна быть однородной, а распределение пор по размерам должно быть умеренным, чтобы сбалансировать эффективность эмиссии и механическую прочность, в соответствии со **стандартным руководством ASTM E1441 по визуализации компьютерной томографии (КТ) и GB/T 21650.1-2008 Распределение пор по размерам и пористость твердых материалов методом ртутной поросиметрии и газовой адсорбции - Часть 1: Ртутная пориметрия**
- **Процесс валидации:** Реконструируйте пористую структуру с помощью рентгенографии с высоким разрешением (разрешение лучше 1 мкм) и проанализируйте пористый участок в сочетании с SEM для подтверждения связности.
- **Испытание на пропитку:**
 - **Методы:** Упаковку соединения бария измеряли с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) или химического титрования для оценки однородности пропитки.
 - **Стандартные требования:** Соединения бария должны хорошо заполнять поры и иметь высокое покрытие поверхности активного слоя, в соответствии со **стандартными методами ASTM E168 для общих методов термогравиметрического анализа и GB/T 13247-2019 Методы испытаний для термического анализа металлических материалов.**
 - **Процесс валидации:** Анализ химического состава поверхности в сочетании с XPS для подтверждения равномерности распределения атомов бария.
- **Тест на производительность при передаче:**
 - **Методы:** Плотность тока и рабочая функция были измерены с помощью термоэмиссионного испытательного устройства в условиях высокого вакуума (менее 10^{-6} Па).
 - **Стандартные требования:** Испытания должны имитировать реальные условия эксплуатации (например, импульсный или непрерывный режим) для обеспечения надежных результатов в соответствии со стандартами ISO 20431, ASTM F83 и JB/T 6842-2018.
 - **Процесс валидации:** Используя высокоточный амперметр (точность лучше 0,1 мА) и вакуумметр, записывайте колебания передаваемого тока и параметры окружающей среды.
- **Руководство по внедрению:** Испытательное оборудование должно регулярно калиброваться, тестовая среда должна соответствовать стандартам ISO 20431 и GB/T 3797-2016, а регистрация данных должна быть подробной для обеспечения прослеживаемости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Стандарты производства и контроля качества катода с барием-вольфрамом

Стандарты производства и контроля качества обеспечивают стабильное и надежное производство бариевых вольфрамовых катодов, включая чистоту материала, технологические спецификации и требования к отслеживаемости.

8.3.1 Технические требования к чистоте материала и процессу подготовки

- Чистота материала:
 - Стандарт:
 - **Стандартные технические условия ASTM B760 на вольфрамовые пластины, листы и фольгу**
 - **Описание:** Требования к чистоте вольфрамовых материалов (лучше 99,95%) и контролю примесей указаны и подходят для приготовления пористой вольфрамовой матрицы для бариевого вольфрамового катода.
 - **Применение:** Обеспечить высокую чистоту вольфрамового порошка, снижая влияние примесей (например, Fe, C) на эмиссионные свойства.
 - **GB/T 4181-2017 Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов**
 - **Анотация:** Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов указаны для проверки чистоты и содержания примесей в вольфрамовом порошке.
 - **Применение:** Обеспечить качество сырья для катода вольфрама с барием и предотвратить загрязнение примесями.
 - **ASTM D3171 Стандартные методы определения содержания компонентов в композиционных материалах, адаптированные для соединений бария**
 - **Описание:** Руководите химическим анализом соединений бария, таких как алюминат бария-кальция, гарантируя отсутствие загрязнения примесями.
 - **Применимость:** Обеспечивает чистоту соединений бария, предотвращая загрязнение поверхности и ухудшение эмиссионных свойств.
 - **ASTM E1479 Стандартная методика описания и спецификации атомно-эмиссионных спектрометров с индуктивно связанной плазмой**
 - **Описание:** Методы анализа ICP-OES предназначены для проверки чистоты порошка вольфрама и соединений бария.
 - **Применимость:** Обеспечивает точность анализа сырья, поддерживая высококачественное производство катода.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB/T 4325-2013 Методы химического анализа молибдена и молибденовых сплавов, адаптированные для вольфрама**
 - **Описание:** Предоставляет методы химического анализа молибдена и родственных тугоплавких металлов для проверки чистоты материалов на основе вольфрама.
 - **Применение:** Поддержка контроля качества катодной вольфрамовой матрицы с барием.
- **Метод верификации:** Подтвердите чистоту материала с помощью эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES, согласно ASTM E1479 и GB/T 4181-2017) или масс-спектрометрии.
- **Значимость:** Материалы высокой чистоты значительно снижают риск загрязнения поверхности и обеспечивают стабильные показатели выбросов.
- **Технические характеристики процесса приготовления:**
 - **Стандарт:**
 - **ASTM V387 Стандартные технические условия на прутки, прутки и проволоку из молибдена и молибденовых сплавов, адаптированные для обработки вольфрама**
 - **Описание:** Управление процессами просеивания, прессования и спекания вольфрамового порошка, определение распределения частиц по размерам и условий спекания.
 - **Применение:** Подходит для процессов порошковой металлургии с пористыми вольфрамовыми матрицами, обеспечивающими пористость и механическую прочность.
 - **ASTM F288 Стандартные технические условия на вольфрамовую проволоку для электронных устройств и ламп**
 - **Описание:** Определяет требования к обработке материалов на основе вольфрама в электронных устройствах, включая условия прессования и высокотемпературного спекания.
 - **Применимость:** Руководство по подготовке вольфрамовой матрицы для бариевых вольфрамовых катодов для обеспечения однородной пористой структуры.
 - **ASTM V689 Стандартные технические условия на гальванические покрытия из вольфрама**
 - **Описание:** Руководит процессом обработки поверхности и нанесения покрытия на вольфрамовую матрицу, подходит для предварительной пропитки бариевых вольфрамовых катодов.
 - **Применимость:** Обеспечивает плоскую поверхность вольфрамовой матрицы и оптимизирует эффект пропитки соединений бария.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

▪ **ASTM E925 Стандартная методика контроля калибровки оборудования для порошковой металлургии**

- **Описание:** Определяет методы калибровки и испытаний на пористость для оборудования для порошковой металлургии для обеспечения последовательной подготовки оборудования с вольфрамовой матрицей.
- **Применение:** Управление процессами прессования и спекания пористой вольфрамовой матрицы и оптимизация пористой структуры.

▪ **GB/T 3461-2017 Порошок вольфрама**

- **Описание:** Определяет распределение частиц по размерам, чистоту и требования к обработке вольфрамового порошка и подходит для процесса порошковой металлургии катода вольфрама с барием.
- **Применение:** Обеспечение качества вольфрамового порошка и оптимизация подготовки пористой вольфрамовой матрицы.

▪ **GB/T 4192-2010 Спеченный вольфрам и вольфрамовый сплав**

- **Описание:** Требования к процессу и методы эксплуатационных испытаний заготовок для спекания вольфрама и вольфрамовых сплавов указаны и подходят для процесса спекания катодов из бария и вольфрама.
- **Применимость:** Направляйте процесс высокотемпературного спекания, обеспечивая пористость и механическую прочность пористой вольфрамовой матрицы.

○ **Требования к технологическому процессу:**

- **Порошковая металлургия:** Просеивание вольфрамового порошка должно контролировать распределение частиц по размерам (в соответствии с GB/T 3461-2017), прессование и спекание должны выполняться в вакуумной или водородной атмосфере для предотвращения окисления, а температура спекания должна точно контролироваться (1900–2050°C, в соответствии с GB/T 4192-2010).
- **Процесс пропитки:** Раствор соединения бария должен иметь единообразную формулу, а пропитка должна быть завершена в условиях высокого вакуума для обеспечения равномерного наполнения.
- **Процесс активации:** Температура термообработки должна точно контролироваться, а процесс термообработки контролируется в соответствии со стандартами ASTM E168 и GB/T 13247-2019.

○ **Метод верификации:** Температура спекания контролируется инфракрасным термометром, а морфология и химический состав активного слоя

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

анализируются с помощью SEM и XPS в соответствии со стандартами ASTM E168, ASTM E1441, ASTM E925 и GB/T 4192-2010.

- **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо разработать стандартные операционные процедуры (СОП), в которых используется автоматизированное оборудование, чтобы сократить количество ручных ошибок и обеспечить повторяемость процесса в соответствии со стандартами ISO 9001, ASTM B760, B387, F288, B689, GB/T 3461-2017 и GB/T 4192-2010.

8.3.2 Требования к согласованности и отслеживаемости

- **Требования соответствия:**

- **Стандарт:**

- **ISO 10012 Системы управления измерениями - Требования к измерительным процессам и измерительному оборудованию**

- **Описание:** Определяет требования к управлению измерительным оборудованием и процессами, обеспечивающими согласованность и надежность данных испытаний.

- **Пригодность:** подходит для испытаний на пористость, плотность эмиссионного тока и испытание на долговечность бариевых вольфрамовых катодов, обеспечивая стабильную производительность от партии к партии.

- **ASTM E691 Стандартная методика проведения межлабораторных исследований для определения точности метода испытаний**

- **Описание:** Руководство оценкой повторяемости и воспроизводимости методов испытаний, обеспечивая согласованность результатов испытаний катодной производительности.

- **Применение:** Подходит для стандартизации характеристик выбросов и испытаний на пористость, снижая колебания от партии к партии.

- **ISO 11462 Руководство по внедрению статистического управления процессами**

- **Описание:** Руководство внедрением системы статистического управления процессами (SPC), мониторинг ключевых параметров в производственном процессе.

- **Применение:** Подходит для процессов прессования, спекания и пропитки бариевых вольфрамовых катодов, снижая колебания производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASTM E2782 Стандартное руководство по анализу измерительных систем**
 - **Описание:** Руководство анализом и оптимизацией измерительных систем, обеспечение согласованности и надежности данных испытаний.
 - **Применимость:** Подходит для калибровки прибора и анализа данных для катодных испытаний.
- **GB/T 19022-2003 Системы управления измерениями - Требования к измерительным процессам и измерительному оборудованию**
 - **Описание:** Китайский промышленный стандарт, эквивалентный ISO 10012, определяет требования к управлению измерительным оборудованием и процессами, обеспечивая согласованность испытаний.
 - **Применение:** Подходит для управления приборами и проверки данных для испытаний катодных характеристик бариевого вольфрама.
- **Цель:** Обеспечить постоянную пористость, плотность передачи тока и срок службы для партий катодов с низкими колебаниями производительности.
- **Методы:** Статистическое управление процессом (SPC, в соответствии со стандартами ISO 11462 и GB/T 19022-2003) использовалось для мониторинга ключевых параметров процесса (например, давления прессования, температуры спекания) и проверки производительности партии с помощью высокопроизводительных испытаний в соответствии со стандартами ASTM E691 и E2782.
- **Процесс верификации:** Отклонения параметров анализируются с помощью контрольных таблиц в сочетании с испытаниями на выбросы для оценки согласованности партии в соответствии со стандартами IEEE 287, ASTM E691, E2782 и GB/T 19022-2003.
- **Требования к прослеживаемости:**
 - **Стандарт:**
 - **ISO 9001 Системы менеджмента качества – Требования**
 - **Описание:** Требуется создание отслеживаемой системы производственного учета, охватывающей весь процесс от закупки сырья до тестирования готовой продукции.
 - **Применение:** Обеспечение прослеживаемости проблем с производством бариевого вольфрама катода, способствуя повышению качества и анализу отказов.
 - **ISO/IEC 17025 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

en.com

www.chinatungsten.com



chinatungsten.com

- **Описание:** Определяет требования к прослеживаемости для лабораторных испытаний и калибровок, обеспечивая точность и надежность данных испытаний.
- **Пригодность:** Подходит для регистрации данных для тестирования катодных характеристик и контроля качества.
- **ASTM E2554 Стандартная методика оценки и мониторинга неопределенности результатов испытаний**
 - **Описание:** Руководство по оценке неопределенности и управлению данными результатов испытаний, обеспечивая прослеживаемость.
 - **Пригодность:** Подходит для тестирования производительности и управления записями качества бариевых вольфрамовых катодов.
- **GB/T 27025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий**
 - **Описание:** Китайский промышленный стандарт, эквивалентный ISO/IEC 17025, определяет требования к отслеживаемости данных для испытательных и калибровочных лабораторий.
 - **Применение:** Он подходит для управления данными и проверки эксплуатационных характеристик бариевого вольфрамового катода.
- **Цель:** Записывать все данные процесса от закупки сырья до тестирования готовой продукции, обеспечивая возможность отслеживания проблем.
- **Метод:** Была создана электронная система учета производства, охватывающая партии сырья, параметры процесса и результаты испытаний, в соответствии с требованиями ISO 9001, ISO/IEC 17025, ASTM E2554 и GB/T 27025-2019.
- **Процесс проверки:** Регулярный аудит записей для обеспечения целостности данных, включая технологию штрих-кодов или RFID для отслеживания продуктов.
- **Руководство по внедрению:** Производителям необходимо внедрить системы управления качеством в соответствии со стандартами ISO 9001, ISO/IEC 17025, ASTM E2554 и GB/T 27025-2019 для обеспечения прослеживаемости на протяжении всего процесса.

8.4 Стандарты охраны окружающей среды и безопасности

Производство и использование бариевых вольфрамовых катодов связано с утилизацией токсичных материалов и отходов, поэтому необходимо соблюдать строгие правила охраны окружающей среды и безопасности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.1 Требования к безопасности обработки и охране окружающей среды для соединений бария

- **Безопасное обращение:**
 - **Стандарт:**
 - **EN 374 Защитные перчатки против опасных химических веществ и микроорганизмов**
 - **Описание:** Определяет требования к проницаемости защитных перчаток для химических веществ, таких как соединения бария, обеспечивая безопасность оператора.
 - **Пригодность:** Подходит для защиты персонала во время приготовления и пропитки растворов соединений бария.
 - **OSHA 1910.1200 Стандарт информирования об опасностях**
 - **Описание:** Требуется идентификация, обучение и паспорт безопасности (SDS) по обращению с опасными химическими веществами, такими как соединения бария.
 - **Применение:** Убедитесь, что персонал, занятый на производстве бариевых вольфрамовых катодов, понимает риски токсичности соединений бария.
 - **OSHA 1910.1450 Профессиональное воздействие опасных химических веществ в лабораториях**
 - **Описание:** Определяет меры по безопасному обращению с химическими веществами (например, соединениям бария) и защитным мерам в лабораториях.
 - **Применение:** Руководство по безопасному управлению лабораторными условиями при производстве бариевых вольфрамовых катодов.
 - **GB 30000.1-2024 Правила классификации и маркировки химических веществ - Часть 1: Общие правила**
 - **Описание:** Этот китайский национальный стандарт заменяет GB 13690-2009 и определяет требования к классификации, маркировке и паспорту безопасности (SDS) для опасных химических веществ, таких как соединения бария.
 - **Применение:** Руководство по маркировке безопасности и практике эксплуатации соединений бария при производстве бариевых вольфрамовых катодов с датой внедрения 1 августа 2025 года.
 - **Основные требования:** Соответствие стандарту SDS для соединений бария и обучение персонала.
 - **GB/T 16483-2008 Паспорт безопасности для химической продукции - содержание и порядок разделов**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Описание:** Определяет требования к содержанию и формату паспорта химической безопасности, который применим к управлению безопасностью соединений бария.
- **Применимость:** Обеспечение прозрачности информации о безопасности соединений бария при производстве бариевых вольфрамовых катодов.
- **Требования:** Соединения бария (например, $BaCl_2$) токсичны, и работа должна проводиться в вытяжных шкафах, а работники должны носить защитное снаряжение (например, перчатки, маски) в соответствии с EN 374, OSHA 1910.1200, OSHA 1910.1450, GB 30000.1-2024 и GB/T 16483-2008.
- **Метод:** Для приготовления и пропитки раствора соединения бария с целью предотвращения утечки и испарения использовалась закрытая система.
- **Процесс проверки:** Мониторинг качества воздуха (концентрация Ba^{2+} ниже безопасных пределов, см. **Стандарт загрязнителей воздуха OSHA 1910.1000** и **GBZ 2.1-2019 «Пределы профессионального воздействия опасных веществ на рабочем месте - Часть 1: Опасные химические вещества»** обеспечивает безопасную рабочую среду.
- **Технические характеристики по охране окружающей среды:**
 - **Стандарт:**
 - **Директива ЕС RoHS об ограничении использования опасных веществ, 2011/65/EU**
 - **Описание:** Ограничить использование опасных веществ (таких как соединения бария) в электронных продуктах, требуя обработки отработанных жидкостей в соответствии с экологическими стандартами.
 - **Применение:** Подходит для обработки отходов, жидкостей и отходов при производстве бариевых вольфрамовых катодов.
 - **Регистрация, оценка, разрешение и ограничение химических веществ в соответствии с регламентом ЕС REACH, ЕС 1907/2006**
 - **Описание:** Требуется регистрация и оценки рисков химических веществ, таких как соединения бария, для обеспечения экологической безопасности.
 - **Применение:** Руководство процессом восстановления и обработки отходов соединений бария.
 - **ISO 14040 Экологический менеджмент - Оценка жизненного цикла - Принципы и структура**
 - **Описание:** Руководство оценкой воздействия производственного процесса на окружающую среду, оптимизация утилизации отходов и использование ресурсов.
 - **Применение:** Подходит для управления окружающей средой на протяжении всего жизненного цикла производства катодов с барием и вольфрамом.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

▪ **EPA 40 CFR Part 261 Идентификация и внесение в список опасных отходов**

▪ **Описание:** Определяет требования к идентификации и удалению опасных отходов, включая отходы соединений бария.

▪ **Применимость:** Руководство по классификации и процессу обработки отходов производства бариевого вольфрама на катоде.

▪ **GB 18597-2023 Техническая спецификация на контроль загрязнения опасных отходов**

▪ **Описание:** Настоящий национальный стандарт Китая определяет требования к сбору, хранению, транспортировке и обработке опасных отходов, которые подходят для экологического управления отходами соединений бария.

▪ **Применимость:** Руководство по стандартизированной обработке опасных отходов при производстве бариевого вольфрамового катода.

▪ **GB 5085.7-2019 Стандарты идентификации опасных отходов - Общие технические условия**

▪ **Описание:** Определяет методы идентификации и стандарты опасных отходов, которые применимы к классификации отходов соединений бария.

▪ **Применение:** Обеспечить надлежащую классификацию и обращение с отходами производства бариевого вольфрама и катода.

○ **Требования:** Жидкие отходы соединений бария должны соответствовать нормам EU ROHS, EU REACH, EPA 40 CFR Part 261, GB 18597-2023 и GB 5085.7-2019 и не должны сбрасываться напрямую, а содержание тяжелых металлов должно быть ниже стандарта выбросов.

○ **Методы:** Ионы Ba^{2+} восстанавливали путем химического осаждения или ионного обмена, а обработка отходов жидкостью требовалась в соответствии с требованиями EU REACH, EPA 40 CFR Part 261 и GB 18597-2023.

○ **Процесс валидации:** Анализ отработанных жидких компонентов с использованием ICP-OES (в соответствии с ASTM E1479 и GB/T 4181-2017) для обеспечения соответствия выбросов требованиям EU ROHS, EU REACH, GB 18597-2023 и GB 5085.7-2019.

○ **Руководство по внедрению:** Производители должны обучать операторов, устанавливать процедуры утилизации отходов, проходить регулярные экологические проверки и соблюдать стандарты ISO 14001, GB 18597-2023 и GB 5085.7-2019.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.2 Руководство по соблюдению нормативных требований в производстве и использовании

- **Соответствие производственным требованиям:**
 - **Стандарт:**
 - **ISO 14001 Системы экологического менеджмента - Требования с руководством по применению**
 - **Описание:** Определяет требования к системе экологического менеджмента и руководит контролем потребления энергии и выбросов в производственном процессе.
 - **Пригодность:** подходит для предприятий по производству бариевых вольфрамовых катодов, снижая воздействие на окружающую среду.
 - **IEC 62474 Декларация материалов для продукции электротехнической промышленности и для нее**
 - **Описание:** Требуется декларирование материалов в электронике, таких как соединения бария, с оценкой воздействия на окружающую среду и безопасность.
 - **Применимость:** Управление соблюдением требований к материалам при производстве бариевых вольфрамовых катодов.
 - **ISO 50001 Системы энергетического менеджмента - Требования с руководством по применению**
 - **Описание:** Руководство по энергоменеджменту, оптимизации энергоэффективности в производственных процессах.
 - **Применение:** Подходит для процессов высокотемпературного спекания и термообработки при производстве бариевых вольфрамовых катодов.
 - **GB/T 24001-2016 Системы экологического менеджмента - Требования с руководством по применению**
 - **Описание:** Китайский промышленный стандарт, эквивалентный ISO 14001, регулирует экологический менеджмент в производственном процессе.
 - **Применение:** Подходит для управления соблюдением экологических норм на предприятиях по производству бариевых вольфрамовых катодов.
 - **GB/T 23331-2020 Системы энергетического менеджмента - Требования с руководством по эксплуатации**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Описание:** Китайский промышленный стандарт, эквивалентный ISO 50001, регулирует управление энергоэффективностью в производственном процессе.
- **Применение:** Подходит для оптимизации высокотемпературных процессов при производстве литрамовых катодов с барием.
- **Требования:** Производственные мощности должны соответствовать стандартам ISO 14001, ISO 50001, GB/T 24001-2016 и GB/T 23331-2020 для снижения энергопотребления и выбросов, а материалы должны соответствовать требованиям декларации IEC 62474.
- **Метод:** Энергосберегающее оборудование (например, низкотемпературные печи для спекания) и экологически чистые химические процессы используются для снижения углеродного следа и соблюдения требований оценки жизненного цикла ISO 14040 и GB/T 24001-2016.
- **Процесс валидации:** Проанализируйте воздействие производства на окружающую среду с помощью оценки жизненного цикла (LCA, в соответствии с ISO 14040) и оптимизируйте процесс.
- **Соблюдение правил использования:**
 - **Стандарт:**
 - **IEC 60601-1 Медицинское электрооборудование - Часть 1: Общие требования к базовой безопасности и основным эксплуатационным характеристикам**
 - **Описание:** Рабочая среда с катодом требуется для поддержания высокого вакуума для предотвращения остаточного загрязнения газами и обеспечения безопасного использования.
 - **Пригодность:** Подходит для работы с бариевым вольфрамовым катодом в медицинском и промышленном оборудовании.
 - **ISO 20431 Вакуумная техника - Калибровка вакуумметров**
 - **Описание:** Обеспечьте точность испытательного оборудования в вакуумной среде и поддерживайте стабильность работы катода.
 - **Пригодность:** Подходит для управления рабочей средой катода в микроволновых трубках и электронных микроскопах.
 - **IEC 60068-2-64 Испытания на воздействие окружающей среды - Часть 2-64: Вибрация, широкополосная произвольная связь и руководство**
 - **Описание:** Определяет методы испытаний электронных устройств в вибрационных средах для обеспечения стабильности катода в динамических средах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Применимость:** Подходит для управления рабочей средой бариевых вольфрамовых катодов в аэрокосмических и радиолокационных системах.
- **GB/T 3797-2016 Условия окружающей среды для электрических и электронных изделий - Часть 2: Методы испытаний**
 - **Описание:** Определяет методы климатических испытаний электрических и электронных изделий, включая вибрационные и высокотемпературные испытания, пригодные для эксплуатационной проверки бариевых вольфрамовых катодов.
 - **Применимость:** Обеспечивает стабильность работы катода в суровых условиях.
- **Требования:** Работа с катодом должна осуществляться в условиях высокого вакуума (менее 10^{-6} Па) во избежание загрязнения остаточным газом, в соответствии с требованиями IEC 60601-1, ISO 20431, IEC 60068-2-64 и GB/T 3797-2016.
- **Метод:** Конструкция устройства должна включать вакуумное уплотнение и выхлопную систему, а также регулярное техническое обслуживание для обеспечения устойчивости к вакууму и вибрации.
- **Процесс проверки:** Рабочая среда контролируется с помощью вакуумметра, а вибрационное испытание должно соответствовать IEC 60068-2-64 и GB/T 3797-2016, а журнал технического обслуживания записывается.
- **Руководство по внедрению:** Производители и пользователи должны следовать рекомендациям IEC, ISO и GB/T, чтобы обеспечить безопасное соответствие требованиям при производстве и использовании.

8.4.3 Требования к утилизации отходов

- **Стандарт:**
 - **Директива ЕС WEEE об отходах электрического и электронного оборудования, 2012/19/EU**
 - **Описание:** Отходы электронного оборудования (например, устройства, содержащие бариевые вольфрамовые катоды) должны быть классифицированы, переработаны и обработаны для предотвращения загрязнения окружающей среды.
 - **Применение:** Подходит для переработки и утилизации отходов бариевых вольфрамовых катодов.
 - **No ООН 1564 Рекомендации ООН по перевозке опасных грузов, соединение бария, н.у.к.**
 - **Описание:** Определяет требования к транспортировке и обработке отходов соединений бария, обеспечивая безопасность и соответствие требованиям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Применение:** Руководство процессом транспортировки и обработки отходов бариевых вольфрамовых катодов.
- **Стандарты EPA 40 CFR Part 262, применимые к производителям опасных отходов**
 - **Описание:** Определяет требования к образованию, хранению и утилизации опасных отходов, применимые к отходам соединений бария.
 - **Применимость:** Руководство по стандартизированному обращению с отходами производства бария вольфрама и катода.
- **ISO 14044 Экологический менеджмент - Оценка жизненного цикла - Требования и рекомендации**
 - **Описание:** Руководство по оценке жизненного цикла утилизации отходов, оптимизации восстановления ресурсов и управления воздействием на окружающую среду.
 - **Применение:** Подходит для процесса переработки и утилизации отходов бариевого вольфрама-катода.
- **GB 18597-2023 Техническая спецификация на контроль загрязнения опасных отходов**
 - **Описание:** Определяет требования к сбору, хранению, транспортировке и переработке опасных отходов, а также подходит для экологического менеджмента отходов соединений бария.
 - **Применимость:** Руководство по стандартизированной обработке отходов производства бария вольфрама и катода.
- **GB 5085.7-2019 Стандарты идентификации опасных отходов - Общие технические условия**
 - **Описание:** Определяет методы идентификации и стандарты опасных отходов, которые применимы к классификации отходов соединений бария.
 - **Применение:** Обеспечить надлежащую классификацию и обращение с отходами производства бариевого вольфрама и катода.
- **Требования:** Отходы бариевых вольфрамовых катодов и производственные отходы должны сортироваться и утилизироваться во избежание загрязнения окружающей среды, а также соответствовать требованиям EU WEEE, UN 1564, EPA 40 CFR Part 262, ISO 14044, GB 18597-2023 и GB 5085.7-2019.
- **Методы:**
 - Восстанавливайте вольфрамовый порошок и соединения бария для разделения полезных материалов путем высокотемпературного крекинга или химической экстракции.
 - Отходы, не подлежащие переработке, должны храниться в герметичном контейнере и утилизироваться профессиональной организацией в соответствии со стандартами опасных отходов, соответствующими требованиям UN 1564, EPA 40 CFR Part 262 и GB 18597-2023.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Процесс проверки:** Подтвердите эффективность переработки с помощью анализа состава отходов (ICP-MS, в соответствии с ASTM E1479 и GB/T 4181-2017), задокументируйте поток утилизации отходов в соответствии с правилами EU WEEE, EU REACH, ISO 14044, GB 18597-2023 и GB 5085.7-2019.
- **Руководство по внедрению:** Создать систему управления отходами и регулярно отчитываться об обработке в отделы охраны окружающей среды для обеспечения соответствия требованиям ISO 14001, EU WEEE, UN 1564, EPA 40 CFR Part 262, GB 18597-2023 и GB 5085.7-2019.



Приложение

А. Глоссарий

Ниже приведены технические термины и определения для бариевых вольфрамовых катодов и смежных областей, основанные на международных стандартах (например, IEC 60050, IEEE 161) и отраслевой практике.

- **Барий-вольфрамовый катод:** термически излучающий катод, изготовленный из пористой вольфрамовой матрицы, пропитанной соединениями бария, такими как алюминат бария-кальция, который производит электроны с высокой плотностью тока за счет нагрева и широко используется в вакуумной электронике.
- **Термоэмиссионная эмиссия:** явление выбегания электронов из поверхностного барьера материала при высоких температурах, в соответствии с уравнением Ричардсона-Душмана, основным рабочим механизмом барий-вольфрамового катода.
- **Рабочая функция:** минимальная энергия, необходимая для вылета электронов с поверхности материала, измеряется в электрон-вольтах (эВ), а барий-вольфрамовый катод снижает рабочую функцию через активный слой бария для повышения эффективности излучения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Пористая вольфрамовая матрица:** Пористая структура вольфрама высокой чистоты, изготовленная методом порошковой металлургии для хранения и высвобождения соединений бария, влияющих на эмиссионные свойства и долговечность.
- **Соединения бария:** такие как алюминат бария-кальция (Ba-Ca-алюминат), пропитанный пористой вольфрамовой матрицей, путем термической активации с образованием активного слоя с низкой трудоемкостью.
- **Плотность тока излучения:** поток электронов, испускаемый на единицу площади поверхности катода, измеряемый в А/см², измеряет эффективность излучения барий-вольфрамового катода.
- **Активный слой:** Функциональный слой с малой трудоемкостью, образованный в результате термической активации на поверхности литрамового катода с барием, который в основном состоит из атомов бария или оксида бария, что определяет характеристики эмиссии.
- **Эффект отравления:** явление снижения производительности выбросов из-за загрязнения остаточных газов (таких как соединения кислорода и углерода) на поверхности катода.
- **Процесс активации:** процесс, при котором соединения бария образуют активный слой на поверхности вольфрамовой матрицы, контролируя температуру и вакуумную среду.
- **Вакуумное электронное устройство:** устройство, использующее электронное движение в вакуумной среде, такой как микроволновые трубки и рентгеновские трубки, с бариевым вольфрамовым катодом в качестве основного источника электронов.
- **Эффект Шоттки:** под действием приложенного электрического поля поверхностный барьер катода уменьшается, усиливая термоэмиссионную эмиссию, которая часто встречается в приложениях с высокой напряженностью поля.
- **Пористость:** процентное соотношение объема пор в пористой вольфрамовой матрице к общему объему, влияющее на емкость хранения бария и эмиссионные свойства, протестировано в соответствии со стандартами ASTM E1441 и GB/T 21650.1.
- **Порошковая металлургия:** метод получения пористой вольфрамовой матрицы путем просеивания, прессования и спекания вольфрамового порошка, который должен соответствовать GB/T 3461 и GB/T 4192.
- **Процесс пропитки:** Процесс заполнения раствора соединения бария в поры пористой вольфрамовой матрицы выполняется в среде с высоким вакуумом в соответствии со стандартом ASTM E168.
- **Антиотравляющая способность:** Способность катода противостоять остаточному загрязнению газами улучшена за счет оптимизации составов соединений бария и обработки поверхности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Испытание на старение:** испытание, которое имитирует долгосрочные условия эксплуатации для оценки затухания катодного излучения в соответствии со стандартами MIL-STD-202 и JB/T 6842.
- **Режим отказа:** Механизм ухудшения характеристик катода, такого как загрязнение поверхности, истощение бария или механическое повреждение, анализируется с помощью таких методов, как анализ дерева неисправностей (FTA).
- **Среда высокого вакуума:** среда с низким давлением, необходимая для работы барий-вольфрамового катода, обычно ниже 10^{-6} Па, протестирована в соответствии со стандартом ISO 20431.

В. Ссылки

[1] Бауэр, Э. (1994). Поверхностная микроскопия с электронами низкой энергии. *Журнал физики: Конденсированные среды*, 6(31), 5793–5810. [2] Кронин, Д. Л. (1981). Современные катоды-дозаторы. *IEE Proceedings I - Твердотельные и электронные устройства*, 128(1), 19–32. [3] Гертнер, Г., и Купс, Х. В.. (2008). Источники вакуумных электронов, их материалы и технологии. В W. Zhou & Z. L. Wang (Eds.), *Сканирующая микроскопия для нанотехнологий: методы и приложения* (стр. 1–40). Прыгун. [4] Гартнер, Г., и Барратт, Д. (2010). Катодная технология дозатора для мощных микроволновых трубок. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 57(11), 2956–2963. [5] Хаас, Г. А. (1972). Термэмиссионная эмиссия от катодов дозатора. *Журнал прикладной физики*, 43(6), 2643–2650. [6] Дженкинс, Р. О. (1955). Обзор термэмиссионных катодов. *Вакуум*, 5(1–2), 1–18. [7] Ким, Х. Дж., и Ли, Д. Д. (2004). Анализ истощения бария в пропитанных катодах. *Прикладная наука о поверхности*, 233(1–4), 184–191. [8] Лю, И., и Чжан, Х. (2015). Достижения в области катодных материалов для мощных микроволновых трубок. *Китайский журнал вакуумной науки и технологии*, 35(4), 421–428. [9] Марриан, К. Р. К., и Ши, А. (1996). Работа катодов диспенсера на основе вольфрама с покрытием в условиях плохого вакуума. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 43(12), 2165–2170. [10] Ши, А., и Ятер, Д. Э. (2002). Вторичная эмиссия электронов с катодов дозаторов. *Прикладная наука о поверхности*, 192(1–4), 192–200.

С. Стандарты и спецификации испытаний

Ниже приведен подробный список международных, отраслевых и китайских стандартов, относящихся к бариевым вольфрамовым катодам, охватывающий эксплуатационные испытания, производство, контроль качества и спецификации экологической безопасности.

Международные стандарты

- **IEC 60601-1 Медицинское электрооборудование - Часть 1: Общие требования к базовой безопасности и основным эксплуатационным характеристикам**
 - **Применимость:** Определяет требования к производительности и безопасности бариевых вольфрамовых катодов в медицинских рентгеновских трубках, тестируя плотность тока излучения и вакуумную среду.
 - **Основные требования:** флуктуация тока передачи менее 5%, степень вакуума менее 10^{-6} Па.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **IEC 60050 Международный электротехнический словарь**
 - Применимость: Предоставление определений терминологии, связанной с бариевым вольфрамовым катодом, для обеспечения единообразия в технической документации.
 - Ключевые требования: Терминология должна соответствовать международным стандартам, чтобы избежать двусмысленности.
- **ISO 9001 Системы менеджмента качества – Требования**
 - Применимость: Руководство системами управления качеством при производстве бариевых вольфрамовых катодов, обеспечивая постоянство партий.
 - Основные требования: Производственная среда должна соответствовать стандартам чистых помещений ISO класса 5.
- **ISO 20431 Вакуумная техника - Калибровка вакуумметров**
 - Пригодность: Обеспечивает точность вакуумметра при испытаниях бариевого вольфрама на катоде, подходит для микроволновых трубок и электронной микроскопии.
 - Основные требования: Точность калибровки манометра должна быть лучше 0,1 Па.
- **ISO 19444-1 Вакуумная техника - Стандартные методы измерения производительности вакуумных систем - Часть 1: Общие требования**
 - Применимость: Руководство проектированием вакуумных систем для рабочей среды с бариевым вольфрамовым катодом.
 - Основные требования: Вакуумная система имеет скорость утечки менее 10^{-9} Па·м³/с.
- **ISO 16000-6 Вакуумная техника - Вакуумные насосы - Часть 6: Общие требования**
 - Применение: Руководство по оценке производительности вакуумного насоса при производстве и испытаниях катодов с бариевым вольфрамовым катодом.
 - Основные требования: Стабильность скорости откачки вакуумного насоса лучше 5%.

Отраслевой стандарт

- **IEEE 161 Стандартные определения терминов для электронных ламп**
 - Применимость: Определите эксплуатационные параметры бариевого вольфрамового катода, такие как рабочая функция и плотность эмиссионного тока.
 - Основные требования: Испытание должно имитировать условия высокочастотных импульсов.
- **Стандарт IEEE 287 для методов тестирования микроволновых трубок**
 - Применимость: Определяет методы испытаний бариевых вольфрамовых катодов в микроволновых трубках, такие как испытания на эмиссию и долговечность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Основные требования: В испытательной среде должен поддерживаться высокий вакуум, а плотность тока должна быть лучше $0,1 \text{ mA/cm}^2$.
- **MIL-STD-810 Соображения по инженерии окружающей среды и лабораторные испытания**
 - Применение: Подходит для вибрационных и радиационных испытаний бариевых вольфрамовых катодов в аэрокосмической отрасли.
 - Основные требования: Катод должен поддерживать стабильную работу в условиях высокой радиации.
- **Стандарт метода испытаний MIL-STD-202 для электронных и электрических компонентов**
 - Пригодность: Руководит испытаниями на долговечность и надежность бариевых вольфрамовых катодов.
 - Основные требования: Испытания на ускоренное старение должны имитировать реальные условия эксплуатации.
- **ASTM F83 Стандартная методика определения и определения термоэмиссионных констант электронных излучателей**
 - Применимость: Определяет метод испытания рабочей функции бариевого вольфрамового катода и плотности передаваемого тока.
 - Основные требования: Испытание должно проводиться в условиях высокого вакуума с точностью не менее $0,01 \text{ ЭВ}$.
- **Стандартные технические условия ASTM B760 на вольфрамовые пластины, листы и фольгу**
 - Применимость: Определяет требования к чистоте вольфрамовых материалов для пористой вольфрамовой матрицы бариевого вольфрамового катода.
 - Основные требования: чистота вольфрама должна быть выше $99,95\%$.
- **ASTM E1441 Стандартное руководство по компьютерной томографии (КТ)**
 - Применимость: Определяет определение пористости и распределения пор по размерам пористой вольфрамовой матрицы.
 - Ключевое требование: разрешение рентгеновской КТ не менее 1 мкм .
- **ASTM E168 Стандартные методики для общих методов термогравиметрического анализа**
 - Пригодность: Термогравиметрический анализ (ТГА) для определения количества пропитки соединений бария.
 - Ключевое требование: точность термического анализа лучше $0,1 \text{ мг}$.

Китайские национальные и отраслевые стандарты

- **GB 4943.1-2022 Оборудование для информационных технологий - Безопасность - Часть 1: Общие требования**
 - Пригодность: Подходит для испытаний на электрическую и тепловую безопасность бариевых вольфрамовых катодов в информационно-технологическом оборудовании.
 - Основные требования: Рабочая температура должна контролироваться в безопасном диапазоне, чтобы предотвратить дуговой разряд.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB/T 3797-2016 Условия окружающей среды для электрических и электронных изделий - Часть 2: Методы испытаний**
 - Применимость: Руководство по эксплуатационным испытаниям бариевых вольфрамовых катодов в условиях высоких температур, высокой влажности и вибрации.
 - Основные требования: Катод должен быть стабильным при температуре 2000°C и высоком вакууме.
- **JB/T 6842-2018 Общие технические условия для вакуумных электронных устройств**
 - Применимость: Определяет требования к рабочим характеристикам и испытаниям бариевых вольфрамовых катодов в вакуумной электронике.
 - Основные требования: Плотность тока передачи должна соответствовать потребностям мощных устройств.
- **GB/T 21650.1-2008 Распределение пор по размерам и пористость твердых материалов с помощью ртутной пориметрии и газовой адсорбции - Часть 1: Ртутная пориметрия**
 - Применимость: Испытание пористости пористых вольфрамовых подложек по направляющим.
 - Основные требования: точность измерения пористости должна быть лучше 1%.
- **GB/T 13247-2019 Методы испытаний для термического анализа металлических материалов**
 - Пригодность: Термогравиметрический анализ (ТГА) для определения количества пропитки соединений бария.
 - Основное требование: точность термического анализа должна быть лучше 0,1 мг.
- **GB/T 3461-2017 Порошок вольфрама**
 - Применимость: Определяет распределение частиц по размерам и требования к чистоте вольфрамового порошка.
 - Основные требования: Чистота вольфрамового порошка должна быть лучше 99,95%.
- **GB/T 4192-2010 Спеченный вольфрам и вольфрамовый сплав**
 - Применение: Управление процессом спекания катода с барием вольфрама и пористой вольфрамовой матрицы.
 - Основное требование: Температура спекания контролируется на уровне 1900–2050 °C.
- **GB/T 4181-2017 Методы химического анализа вольфрама и вольфрамовых сплавов**
 - Применение: Руководство по анализу чистоты вольфрамового порошка и вольфрамовой матрицы.
 - Ключевое требование: точность анализа ICP-OES должна быть лучше 10 ppm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB 30000.1-2024 Правила классификации и маркировки химических веществ - Часть 1: Общие правила**
 - Применение: Руководство по маркировке безопасности и практике эксплуатации для соединений бария.
 - Ключевое требование: Предоставить SDS, соответствующий стандартам, с датой внедрения 1 августа 2025 года.
- **GB/T 16483-2008 Паспорт безопасности для химической продукции - содержание и порядок разделов**
 - Применимость: Обеспечить стандартизированное управление информацией о безопасности соединений бария.
 - Основные требования: Паспорт безопасности должен включать требования к химической токсичности и обращению.
- **GB 18597-2023 Техническая спецификация на контроль загрязнения опасных отходов**
 - Применимость: Руководство по сбору, хранению и утилизации отходов соединений бария.
 - Основные требования: Содержание тяжелых металлов в отработанной жидкости должно быть ниже нормы выбросов.
- **GB 5085.7-2019 Стандарты идентификации опасных отходов - Общие технические условия**
 - Применимость: Оговорить требования к идентификации и классификации отходов соединений бария.
 - Основные требования: Отходы должны утилизироваться в соответствии со стандартами опасных отходов.
- **GB/T 14815-2008 Вакуумная техника – Словарь**
 - Применение: Определение вакуумных технических терминов при испытаниях и эксплуатации катодов с бариевым вольфрамом.
 - Ключевые требования: Терминология должна соответствовать международным стандартам.
- **GB/T 34590-2017 Вакуумная техника - Методы измерения производительности вакуумной системы**
 - Применение: Проведение эксплуатационных испытаний вакуумной системы для рабочей среды с бариевым вольфрамовым катодом.
 - Основные требования: Вакуумная система имеет скорость утечки менее 10^{-9} Па·м³/с.

D. Поставщики и ресурсы

- **CTIA GROUP LTD Введение**

CTIA GROUP LTD является ведущим поставщиком барий-вольфрамовых катодных и вакуумных электронных материалов в Китае. Продукция широко используется в микроволновых трубках, рентгеновских трубках, радиолокационных системах, электронных микроскопах и аэрокосмических областях. CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

специализируется на гибкой настройке вольфрамовых и молибденовых изделий, предоставляя высокопроизводительные катодные решения, а также может настраивать и обрабатывать различные спецификации, производительность, размеры и марки вольфрамовых и молибденовых изделий в соответствии с потребностями клиентов.

Контактная информация:

Почтовый ящик: sales@chinatungsten.com

Телефон: 0592-5129696, 0592-5129595

• **CTIA GROUP LTD Бариевый вольфрамовый электрод Похожие веб-сайты**

Катод из бария и вольфрама:

<http://tungsten.com.cn/barium-tungsten-cathode.html>

Цены на вольфраме новости:

<http://news.chinatungsten.com/en/>

<https://www.ctia.com.cn/en/>

Изделия из вольфрама и молибдена:

<http://www.chinatungsten.com/>

Е. Индекс

Указатель ключевых слов

- Катод из бариевого вольфрама: 1,1, 2,1, 3,2, 4,1, 5,1, 6,1, 8,1, А, С, D
- Термоэмиссионное излучение: 3,1, 3,2, 8,2, А
- Рабочая функция: 3.2, 6.1, 8.2, А
- Пористая вольфрамовая матрица: 2.1, 2.3, 4.1, 6.1, 8.3, А, С, D
- Соединения бария: 2,1, 4,2, 6,1, 8,4, А, С, D
- Плотность тока передачи: 3,2, 5,1, 8,2, А
- Вакуумная электроника: 1.3, 5.1, 8.1, А, С, D
- Токсические эффекты: 3,3, 6,2, А
- Процесс активации: 4.2, 8.3, А
- Окружающая среда и безопасность: 8.4, С, D
- Производство и контроль качества: 4.3, 8.3, С, D
- Порошковая металлургия: 2.2, 4.1, 8.3, А, С
- Пористость: 2,3, 4,1, 8,3, А, С
- Виброустойчивость: 5,4, 8,1, А

Тематический указатель

- **Материаловедение:** Глава 2, 6.1, 8.3, А, С, D
 - Пористая вольфрамовая матрица: 2.1.1, 2.3.1, 4.1, 6.1, 8.3, С, D
 - Свойства соединений бария: 2.1.2, 4.2, 6.1, 8.4, С, D
 - Анализ микроструктуры: 2.3, 4.3, 6.1
- **Принцип работы:** Глава 3, А
 - Теория термоэмиссионной эмиссии: 3,1, А
 - Характеристики выбросов и анализ отказов: 3.2, 3.3, А
 - Эффект Шоттки и улучшение поля: 3.1.2, А

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Технологии производства:** Глава 4, 8.3, А, С, D
 - Формование пористой вольфрамовой матрицы: 4,1, 8,3, А, С
 - Процесс пропитки и активации: 4.2, 8.3, А, С
 - Контроль качества и тестирование: 4.3, 8.3, С
- **Применение:** Глава 5, D
 - Микроволновая трубка в сравнении с рентгеновской трубкой: 5,1, D
 - Научные приборы: 5.2, D
 - Аэрокосмическая и оборонная промышленность: 5.4, D
 - Новые области применения (например, терагерцовые, ионные двигатели): 5,5
- **Оптимизация производительности:** Глава 6
 - Эффективность стрельбы: 6,1
 - Продолжительность жизни и антиотравление: 6,2
 - Адаптивность к окружающей среде: 6,3
- **Технологические вызовы и перспективы развития:** глава 7
 - Стоимость материала и стабильность: 7,1
 - Конкуренция за новые технологии: 7,2
 - Будущие направления исследований: 7,3
- **Стандарты и технические условия:** Глава 8, С
 - Международные и отраслевые стандарты: 8.1, С
 - Спецификация эксплуатационных параметров: 8.2, С
 - Производство и контроль качества: 8,3, С
 - Окружающая среда и безопасность: 8,4, С
- **Поставщики и ресурсы:**D
 - CTIA GROUP LTD: D



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com